

RICARDO CARDOSO FIALHO

**GASES DE EFEITO ESTUFA, DINÂMICA DE RAÍZES FINAS E DE
CARBONO EM SOLOS DE FLORESTAS PLANTADAS DE EUCALIPTO**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

F438g
2016 Fialho, Ricardo Cardoso, 1982-
Gases de efeito estufa, dinâmica de raízes finas e de
carbono em solos de florestas plantadas de Eucalipto / Ricardo
Cardoso Fialho. – Viçosa, MG, 2016.
xii, 83f : il. : 29 cm.

Orientador: Ivo Ribeiro da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Gases estufa. 2. Efeito estufa (Atmosfera). 3. Solos
florestais - Uso. 4. Eucalipto - Cultivo. 5. Eucalipto - Rêzes.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.
Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
II. Título.

CDD 22 ed. 631.583

RICARDO CARDOSO FIALHO

**GASES DE EFEITO ESTUFA, DINÂMICA DE RAÍZES FINAS E DE
CARBONO EM SOLOS DE FLORESTAS PLANTADAS DE EUCALIPTO**

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


APROVADA: 10 de junho de 2016.



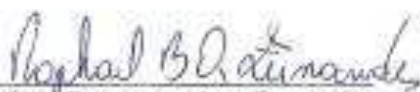
Aristides Ribeiro




Flávio Novais Nunes



Leonarduz Vergutz
(Coorientador)



Raphael Bragança Alves Fernandes



Ivo Ribeiro da Silva
(Orientador)

A Deus,
Aos meus pais, José Maria e Lucí
À minha noiva, Marcella
Aos meus irmãos, cunhados, sobrinhos e família
Com carinho dedico.

“Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, mas continue em frente de qualquer jeito.”

Martin L. King

"Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa,
nunca tem medo e nunca se arrepende."

Leonardo da Vinci

“No que diz respeito ao desempenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo.

Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

Ayrton Senna

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Solo e Nutrição de Plantas, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela oportunidade concedida, estrutura fornecida e pelo apoio financeiro.

Ao professor Ivo Ribeiro da Silva, pela orientação segura, incentivo, ensinamentos e, sobretudo, pela compreensão e amizade.

Aos professores Aristides Ribeiro, Leonardus Vergutz e Raphael Bragança Alves Fernandes e ao pesquisador Flancer Novais Nunes, pelas sugestões, críticas, esclarecimentos e amizade.

A todos os professores que, de forma direta e/ou indireta, contribuíram com o conhecimento adquirido.

À Fibria S.A., em especial aos funcionários do setor de pesquisa Luiz Otávio, Ailton, Ronivon, Claudiney (Piruca), Alceu, Sr. Divino, Cícero, João, Éder, Gilson, dentre outros, pela disponibilização da área experimental, alojamento e dados cedidos gentilmente.

À empresa Vallourec Florestal, em especial ao Gustavo Castelo Branco e ao Dayvid, pela disponibilização da área experimental, alojamento e dados cedidos gentilmente.

Aos estagiários e amigos Ana Paula, João Ramyller e Marina pela dedicação, apoio e amizade.

Aos funcionários do DPS/UFV em especial ao João Milagres, Humberto, Sr. Cardoso, Beto, Luciana, Giovani, Júlio dentre os demais, pela amizade, convívio e auxílio na concretização desse trabalho.

A todos os amigos (estagiários, mestrandos, doutorandos e laboratoristas) do Laboratório de Isótopos Estáveis, em especial ao Rafael Teixeira, Gabriel, João Milagres e Humberto, pela ajuda com as amostragens de campo, análises, dados cedidos gentilmente, aprendizado, convívio e amizade. Além dos amigos de departamento sem exceções pela recepção, amizade e companheirismo.

Aos grandes amigos da Galera OK, pela amizade, companheirismo e presença sempre que necessário.

Aos meus pais, irmãos, cunhados e sobrinhos pelo amor, confiança e força nos momentos difíceis.

À minha noiva Marceli, que de forma muito especial, agradeço pela paciência, força, amor e carinho.

Aos meus familiares pelo apoio, carinho e torcida sempre.

A todos que contribuíram de uma forma ou de outra, deixo aqui meus sinceros agradecimentos!!!

BIOGRAFIA

Ricardo Cardoso Fialho, filho de José Maria Fialho e de Lucí Cardoso Fialho, nasceu no dia 29 de setembro de 1982, na cidade de Viçosa, Estado de Minas Gerais.

Em março de 2006, ingressou na Universidade Federal de Viçosa. Em disciplina cursada no Departamento de Solos despertou o interesse pela área, onde participou de projetos de pesquisa como estudante de iniciação científica. Em janeiro de 2010, graduou-se como Engenheiro Agrônomo.

No mês de março, deste mesmo ano, iniciou o curso de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, na área de concentração Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2012.

Em setembro de 2012 ingressou no curso de Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, na área de concentração Fatores e Processos em Solos de Ecossistemas Florestais. Executou seus experimentos de campo nas empresas Fibria S.A. e Vallourec Florestal, onde grande experiência foi adquirida. Em Junho de 2016 submeteu-se à defesa da tese.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	2
Capítulo 1.....	4
IMPACTO DA COLHEITA E PREPARO DO SOLO NOS FLUXOS DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO NO CERRADO	4
Resumo	4
Abstract.....	4
INTRODUÇÃO	5
MATERIAL E MÉTODOS	7
RESULTADOS.....	10
Efeito dos métodos de colheita na emissão dos GEEs.....	10
Efeito do preparo do solo na emissão dos GEEs em área colhida com Feller+Skidder	12
Efeito do preparo do solo e dos resíduos na emissão dos GEEs em área colhida com Harvester+Forwarder	13
DISCUSSÃO	16
Efeito dos métodos de colheita na emissão dos GEEs.....	16
Efeito do preparo do solo na emissão dos GEEs em área colhida com Feller+Skidder	18
Efeito do preparo do solo e dos resíduos na emissão dos GEEs em área colhida com Harvester+Forwarder	19
CONCLUSÕES	20
Agradecimentos	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20
Capítulo 2.....	25
EFEITO DE FONTES DE N NA EMISSÃO DE N ₂ O E CO ₂ DO SOLO SOB POVOAMENTOS DE EUCALIPTO NO BRASIL	25
Resumo	25
Abstract.....	25
INTRODUÇÃO	26
MATERIAL E MÉTODOS	27
RESULTADOS.....	29
Emissões de N ₂ O do solo.....	30

Emissões de CO ₂ do solo	30
DISCUSSÃO	34
CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
Capítulo 3.....	42
CONTRIBUIÇÃO DE RAÍZES FINAS DO EUCALIPTO PARA MATÉRIA ORGÂNICO DO SOLO	42
Resumo	42
Abstract.....	42
INTRODUÇÃO	43
MATERIAL E MÉTODOS	44
Descrição da área de estudo.....	44
Instalação do experimento	45
Preparo das amostras.....	46
Análises dos dados.....	47
Crescimento e aporte de C ao solo pelas raízes finas.....	47
Produção de raízes finas.....	47
Renovação de raízes finas.....	47
Aporte de C ao solo via raízes finas.....	48
C do solo derivado de raízes finas	48
Análises estatísticas	49
RESULTADOS.....	49
Produção, taxa de renovação e aporte de C ao solo pelas raízes finas.....	49
Carbono do solo derivado raízes finas	51
DISCUSSÃO	52
Produção, taxa de renovação e aporte de C ao solo pelas raízes finas.....	52
Carbono do solo derivado de raízes finas	55
CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
Capítulo 4.....	63
DINÂMICA DO CARBONO E FLUXO DE GASES EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO EM MINAS GERAIS	63
Resumo	63
Abstract.....	63
INTRODUÇÃO	64

MATERIAL E MÉTODOS	65
RESULTADOS.....	69
Estoques de Carbono e Nitrogênio total do solo.....	69
Fluxos de CO ₂ e CH ₄	69
Índice de Manejo de Carbono	72
DISCUSSÃO	73
Estoque de Carbono e Nitrogênio	73
Fluxos de CO ₂ e CH ₄	75
Índice de Manejo de Carbono	76
CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
CONCLUSÕES GERAIS	82

RESUMO

FIALHO, Ricardo Cardoso, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Junho de 2010. **Gases de efeito estufa, dinâmica de raízes finas e de carbono em solos de florestas plantadas de eucalipto.** Orientador: Ivo Ribeiro da Silva. Coorientadores: Emanuelle Mercês Barros Soares e Leonarduz Vergutz.

O crescente cultivo de florestas plantadas de eucalipto no bioma Cerrado brasileiro, segundo maior bioma do país, e a atual preocupação com as mudanças climáticas, motivaram o atual estudo. A tese foi dividida em quatro capítulos que englobam as fases de pré corte ao pós plantio do eucalipto, fase do ciclo da cultura onde as maiores interferências físico-químicas do solo ocorrem. No primeiro capítulo foram avaliados o impacto de diferentes métodos de colheita e preparo do solo para o plantio de povoamentos de eucalipto no carbono orgânico do solo (COS) por meio dos fluxos de gases de efeito estufa (GEEs). Foi avaliada a emissão dos GEEs de solos de talhão submetido a dois métodos de colheita, Feller + Skidder (F+S) e Harvester + Forwarder (H+F), antes e após a colheita, e antes e após o preparo do solo (subsolagem) em cada método de colheita. O solo sob eucalipto colhido pelo método F+S proporciona os maiores fluxos de CO₂ para atmosfera quando comparado ao H+F, devido ao distúrbio causado à superfície do solo e as cepas do eucalipto, principalmente após a subsolagem, em que se expõe o COS anteriormente protegido. Os solos sob plantio de eucalipto estudado atuam como drenos de CH₄ e esses influxos não são afetados pelos sistemas de colheita, preparo do solo e manejo dos resíduos. Não foi observado emissões líquidas de N₂O do solo, porém não há também indícios de sequestro desse gás. No segundo capítulo avaliou-se o efeito de diferentes fontes nitrogenadas nas emissões de N₂O e CO₂ em solos cultivados com eucalipto em três regiões do Brasil. As avaliações de N₂O e CO₂ foram realizadas em câmaras estáticas instaladas no solo sob povoamentos de eucalipto nas regiões de Monte Carmelo - MG, São Gabriel - RS e em Três Lagoas - MS. Os fluxos de N₂O do solo sob povoamentos de eucalipto são baixos, mesmo sob condições favoráveis de umidade e aplicação de fertilizantes nitrogenados. Os solos sob povoamentos de eucalipto nas três regiões proporcionam emissões médias de 1,92 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N₂O e de 553,53 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂. Os fluxos de CO₂ do solo se dão nos primeiros dias após a fertilização nitrogenada do solo. No terceiro capítulo estimou-se o aporte de C ao solo via raízes finas do eucalipto manejado sob talhadia (condução) e alto fuste (reforma). Aparatos metálicos preenchidos com o solo de pastagem (C4) foram instalados no solo sob eucalipto com o propósito de avaliar a substituição da

MOS por meio da alteração da razão isotópica do C. As coletas dos aparatos foram ao longo do tempo. O eucalipto manejado sob reforma proporcionou maiores incrementos de raízes finas ao solo, porém o manejado sob condução apresentou maior taxa de renovação e aporte de C ao solo. As raízes finas do eucalipto contribuíram ao ano com 17 e 13 % do C total do solo ao final de um ano. A taxa de recuperação do C aportado pelas raízes finas do eucalipto pelo solo foi de 42,5 e 28 %, respectivamente, para o manejo de condução e reforma. No último capítulo avaliou-se a dinâmica do carbono orgânico do solo e os fluxos de gases em povoamentos de eucalipto prestes a serem colhidos após serem cultivados com diferente adubação e irrigação. Amostras de solo e de gases foram coletadas em povoamentos de eucaliptos cultivados sem e com irrigação (em área total), e com diferentes adubações (comercial da empresa e potencial). O cultivo do eucalipto prestes a ser colhido apresentou potencial em acumular C-total, atuar como dreno de CO₂ e CH₄ atmosférico, além de recuperar a qualidade do solo, quando se avalia o perfil do solo como um todo, comparado ao cerrado nativo.

ABSTRACT

FIALHO, Ricardo Cardoso, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June 2010. **Greenhouse gases, dynamics of fine roots and soils carbon in planted eucalyptus forests.** Adviser: Ivo Ribeiro da Silva. Co-Advisers: Emanuelle Mercês Barros Soares and Leonarduz Vergutz.

The increasing short-rotation eucalyptus cultivation in the Brazilian Cerrado biome, the second largest biome in the country, and the current concern about climate change motivated the current study. This thesis is divided into four chapters that cover the stages of pre-cut to after planting eucalyptus phase when the largest physico-chemical interference on soil occur. In the first chapter we evaluated the impact of different methods of harvesting and soil preparation for planting of eucalyptus on soil organic carbon (SOC) by measuring greenhouse gas fluxes (GHGs). The emissions of GHGs under two harvesting methods Feller + Skidder (F+S) and Harvester + Forwarder (H+F) was evaluated, before and after harvesting, and before and after site preparation for new planting (subsoiling). The soil under eucalyptus harvested with the F+S method led to the highest CO₂ fluxes into the atmosphere as compared to the H+F module as result of greater disturbance caused to the soil surface, especially after the subsoiling, which exposes the previously protected COS. The soils under eucalyptus plantation were found to act as CH₄ drains and these influxes are not affected by the wood harvesting systems, soil preparation and waste/residue management. There was no net emission of N₂O soil, but there was also no evidence for net N₂O gas sequestration by the soil. In the second chapter we evaluated the effect of different nitrogen sources on emissions of N₂O and CO₂ in soils cultivated with eucalyptus in three distinct regions in Brazil. Evaluations of N₂O and CO₂ were performed using static chamber installed on the soil surface under eucalyptus plantations in the regions of Monte Carmelo - MG, São Gabriel - RS and Três Lagoas - MS. The N₂O fluxes of soil under eucalyptus plantations are low, even under favorable conditions of moisture and application of nitrogenous fertilizers. Emissions of N₂O and CO₂ by soils under eucalyptus plantations in the three regions averaged 1.92 kg ha⁻¹ yr⁻¹ and 553.53 kg ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. Most soil CO₂ effluxes occurred in the first days after nitrogen fertilization of the soil. In the third chapter we studied the contribution to SOC by fine roots of eucalyptus managed under coppicing or new planting. Screened stainless steel cores filled with pasture soil (most C-C4-derived C) were installed in the top soil under eucalyptus in order to assess fine root growth and turnover as well as their contribution to SOC by tracking down the

changes in the ^{13}C natural abundance. We buried the root ingrowth cores and then sampled them over distinct time periods. Eucalyptus managed under new planting has greater fine roots growth, while that managed under coppicing showed a higher turnover rate and C input to soil. Fine eucalyptus roots contributed with 17 and 13% of the total soil C at the end of the first year. The recovery rate of C contributed by the fine roots of eucalyptus to the soil was 42.5 and 28%, respectively, for stands managed under coppicing and new planting. In the last chapter we evaluated the contents of soil organic carbon fractions and gas fluxes in a eucalypt plantation at pre-harvest time as affected by fertilization and irrigation treatments. Soil samples and soil surface gas flux were collected in stands of eucalyptus grown under rainfed or irrigated conditions, either with a conventional standard fertilization or an alternative (higher potential yield) fertilization. Eucalyptus stands at pre-harvest age (7- yr old) have the potential to accumulate more SOC, and also act as net drains for atmospheric CO_2 and CH_4 . They improve soil quality when evaluating the C accumulation and distribution in the soil profile as a whole, as compared to the soil under the native Cerrado vegetation.

INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente as mudanças climáticas têm despertado o interesse da comunidade científica para elaboração de estratégias que busquem diminuir e mitigar as emissões dos gases de efeito estufa (GEEs). No Brasil, a agricultura é responsável por 75% das emissões dos GEEs (Cerri et al., 2009; Cerri e Cerri, 2007), principalmente devido ao desmatamento e preparo intensivo do solo. No entanto, este cenário vem sendo modificado por metas governamentais que buscam a redução do desmatamento e recuperação de áreas sob pastagens degradadas, além de financiamento de projetos de baixa emissão de C (INPE, 2015; Hansen et al., 2013). No entanto, não basta apenas reduzir as emissões dos GEEs, é necessário elaborar estratégias que aumentem seu sequestro (Lal, 2008).

Dentre os principais GEEs destacam-se o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), os quais se encontram em concentrações médias na atmosfera terrestre de 379, 1,77 e 0,32 ppm, respectivamente (IPCC, 2013). O solo é um dos principais reservatórios ativos de C na biosfera, com aproximadamente 1.550 bilhões de toneladas como carbono orgânico do solo (COS) (Lal, 2008). Porém, quantificar os estoques e desvendar o potencial do solo em acumular C continua a ser um desafio.

Nesse contexto, as florestas plantadas, em especial as de eucalipto, destacam-se por fixar C atmosférico na forma de biomassa acima e abaixo do solo (Gatto et al., 2010; Lima et al., 2006; Pulrolnik et al., 2009; Zinn et al., 2011). Embora os estudos científicos sobre o assunto venham aumentando em face das mudanças climáticas, em censo, pouco se sabe sobre a dinâmica do COS durante as fases da operação dos plantios comerciais do eucalipto. Dentre estas destaca-se o período compreendido entre o pré corte e o pós plantio (colheita, preparo do solo e adubação), fase essa do ciclo de cultivo de maior interferência físico-químico do solo. Preocupação ainda maior é gerada quando essas operações florestais são realizadas em cultivos florestais alocados no bioma Cerrado brasileiro, onde os solos apresentam elevado grau de intemperização, baixa fertilidade natural e dependência das propriedades da matéria orgânica do solo.

Esta tese, composta por quatro capítulos, aborda algumas dessas lacunas. No primeiro capítulo, o foco foi avaliar o impacto de diferentes métodos de colheita e preparo do solo, para plantio de povoamentos de eucalipto, no COS, por meio do estudo dos fluxos de GEEs. No segundo capítulo, procurou-se avaliar o efeito da aplicação de diferentes fontes de nitrogênio sobre as emissões de N_2O e CO_2 , em solos cultivados

com eucalipto. No terceiro capítulo buscou-se estimar o aporte de C ao solo, via raízes finas, por florestas de eucalipto manejadas sob talhadia (condução) ou alto fuste (reforma), e a taxa de recuperação/estabilização desse C na forma de carbono orgânico do solo. Por fim, no quarto capítulo, estudou-se o conteúdo e distribuição no perfil do solo do carbono orgânico e os fluxos de gases na superfície de solos sob povoamentos de eucalipto prestes a serem colhidos após terem sido cultivados com diferentes adubações e irrigações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cerri CC, Maia SMF, Galdo MV, Cerri EP, Feigl BJ, Bernoux M. Brazilian Greenhouse Gas Emissions : the Importance of Agriculture and Livestock. **Sci. Agri.**, v. 66, n. November/December, p. 831–843, 2009.

Cerri CC, Cerri CE. Agricultura e aquecimento global. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 19, p. 40–44, 2007.

Gatto A, Barros NF, Novais RF, Silva IR, Leite HG, Leite FP, Villani EMA. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1069–1079, 2010.

Hansen MC, Potapov P V, Moore R, Hancher M, Turubanova S A, Tyukavina A, Thau D, Stehman, SV, Goetz SJ, Loveland TR, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice CO, Townshend JRG. High-resolution global maps of forest cover change. **Science**, v. 342, n. 6160, p. 850–853, 2013.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Taxas anuais do desmatamento - 1988 até 2014. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2014.htm>. Acesso em: Abril 2015.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: the physical science basis. [Acesso em: 01 de março de 2016]. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

Lal R. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools. **Energy and Environmental Science**, London, v. 1, p. 86-100, 2008.

Lima AMN, Silva IR, Neves JCL, Novais RF, Barros NF, Mendonça ES, Smyth TJ, Moreira MS, Leite FP. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 235, n. 1-3, p. 219–231, 2006.

Pulrolnik K, Barros NF, Silva IR, Novais RF, Brandani CB. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no vale do Jequitinhonha - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125–1136, 2009.

Zinn YL, Lal R, Resck DVS. Eucalypt plantation effects on organic carbon and aggregation of three different-textured soils in Brazil. **Soil Research**, v. 49, n. 7, p. 614–624, 2011.

Capítulo 1

IMPACTO DA COLHEITA E PREPARO DO SOLO NOS FLUXOS DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO NO CERRADO

Resumo

As florestas plantadas de eucalipto se destacam pelo alto potencial em sequestrar C-CO₂ da atmosfera durante seu crescimento. Porém sua dinâmica no solo quando se considera os gases de efeito estufa (GEEs) ainda é pouco conhecida, principalmente quando são considerados os métodos de colheita, manejo de resíduos pós-colheita e preparo do solo para a rotação subsequente da cultura. O trabalho teve como objetivo avaliar o impacto de diferentes métodos de colheita e preparo do solo para plantio de povoamentos de eucalipto na dinâmica do carbono orgânico do solo (COS) por meio dos fluxos de GEEs. O estudo foi realizado na região de Três Lagoas-MS em plantações comerciais de eucalipto sob Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Foram selecionadas áreas adjacentes cultivadas com eucalipto no final da primeira rotação (7 anos) implantados em áreas cultivadas com pastagens degradadas, as quais foram colhidas por diferentes métodos de colheita: 1 – Feller + Skidder (F+S) e 2 – Harvester + Forwarder (H+F). As amostragens de solo e GEEs foram realizadas antes da colheita, após a colheita e após a subsolagem das áreas. Para a coleta dos GEEs foram instalados, após cada manejo do solo, câmaras de PVC à 5 cm de profundidade nas linhas e entrelinhas de plantio. Foram obtidas as concentrações de CO₂, CH₄ e N₂O e o $\delta^{13}\text{C-CO}_2$. O delineamento experimental utilizado foi o de medidas repetidas no tempo com oito repetições. O solo sob eucalipto colhido pelo método F+S proporciona os maiores fluxos de CO₂ para atmosfera quando comparado ao H+F, devido ao distúrbio causado à superfície do solo e as cepas do eucalipto, principalmente após a subsolagem onde expõe o COS anteriormente protegido. Os solos sob plantio de eucalipto estudado atuam como drenos de CH₄ e esses influxos não são afetados pelos sistemas de colheita, preparo do solo e manejo dos resíduos. Não foram observadas emissões líquidas de N₂O do solo, porém não há também indícios de sequestro desse gás pelos solos.

Abstract

The planted eucalyptus forests stand out for the high potential to sequester C-CO₂ from the atmosphere during their growth cycle. However, the effect of eucalypt cultivation and management on the soil greenhouse gases (GHGs) fluxes is still little known. It is particularly true when considering the harvest systems, post-harvest waste management and soil preparation for the second forest cycle. The present study aimed at assessing the impact of different harvesting modules and soil preparation for planting a new eucalyptus stands on soil organic carbon (COS) through the measurement of soil surface GHG fluxes. The study was conducted in the region of Três Lagoas-MS in clonal 7 yr-old eucalyptus plantations under a dystrophic Oxisol. Adjacent eucalyptus stands first planted in degraded pasture areas were selected and then we evaluated the effect of two different harvesting modules: 1- Feller-skidder (F+S) and 2-Harvester-Forwarder (H+F). Soil sampling and soil surface GHGs fluxes were carried out just before harvest, just after harvest and after harvest and site preparation (subsoiling) for the new rotation planting. To collect the GHG we installed static PVC chambers on the soil surface after each soil management. The chambers were inserted 5 cm. deep in to the soil, both on the planting row and between planting rows. The increase in concentrations of CO₂, CH₄, N₂O and $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ were determined along the collection time. The experimental

design was repeated measures with eight replications. The soil under eucalyptus harvested by F+S module led to the highest CO₂ flows to the atmosphere when compared to H+F due to the greater disturbance caused to the soil surface, especially after the subsoiling operation which exposed the previously protected COS. The sandy soils of Cerrado under eucalyptus plantations act as net CH₄ drains and they are not affected by harvesting systems, soil preparation and waste management. We observed no net N₂O emissions by the soil in the current study, but there is also no evidence for N₂O sequestration either.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a agricultura é importante fonte de gases de efeito estufa (GEEs), devido ao desmatamento e manejo intensivo do solo, o que tem despertado a preocupação com a qualidade do solo e com o seu uso sustentável. Dentre os principais GEEs destacam-se o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). O potencial de aquecimento global em equivalente de CO₂ é de 23 e 296 vezes para o CH₄ e N₂O, respectivamente, (IPCC, 2013).

No âmbito das mudanças climáticas, as florestas plantadas destacam-se, pois podem atuar como fonte e/ou dreno desses gases de efeito estufa (GEEs). No entanto, isso depende do uso, sistema e manejo a que forem submetidas (Lal, 2008).

A mecanização das operações florestais é inevitável, pois proporciona aumento de rendimento da colheita, melhor aproveitamento da mão-de-obra, redução dos riscos de acidentes e, conseqüentemente, redução de custos, conduzindo a produção eficiente de madeira.

Entre as diferentes operações silviculturais, aquelas relacionadas com a colheita e preparo do solo têm gerado maiores preocupações, pois pode acelerar o processo de degradação dos solos, pelo aumento do tráfego de máquinas, manejo dos resíduos pós-colheita e reforma do talhão para o ciclo seguinte (Seixas, 2002; Silva et al. 2007a; Silva et al., 2007b). Tais operações podem, portanto, causar impactos negativos ao solo e comprometer seu potencial produtivo (Jesus et al., 2015). Adicionalmente, essas operações podem influenciar a exportação de nutrientes em função do manejo dos resíduos da colheita (Bellote et al., 2008; Repo et al., 2012), danos às árvores remanescentes, prejuízos à capacidade de rebrota das cepas e na compactação do solo florestal (Ampoorter et al., 2010), além de prejudicar o desenvolvimento e o crescimento de raízes (Fenner, 2002). Para Seixas (2000) e Silva et al. (2007a) o efeito do tráfego das máquinas florestais sobre o solo varia com o número de passadas, tipo de máquina utilizada na colheita e rodado, além do teor de matéria orgânica do solo.

Apesar dos avanços em relação ao entendimento do impacto dos diferentes métodos de colheita do eucalipto e preparo do solo na qualidade física (Silva et al., 2007a; Silva et al., 2007b) e química dos solos (Walmsley et al., 2009), pouco se sabe sobre seus efeitos em relação à dinâmica do carbono orgânico do solo (COS) em clima tropical.

Nave et al. (2010) e Clarke et al. (2015), em revisões de literatura a respeito do impacto da colheita florestal nos estoques de COS em climas temperados, relatam que perdas de COS são frequentes. Aliado a isso, trabalhos realizados anteriormente com métodos de colheita que envolvem corte e processamento das árvores dentro do talhão (ex: Harvester + Forwarder; resíduos da colheita permanecem no talhão) em comparação com aqueles que processam as árvores na borda do talhão (ex: Feller + Skidder; resíduos geralmente não são retornados para dentro do talhão) relatam várias implicações na produção florestal e na sustentabilidade ambiental (Merino et al., 2005; Olsson et al., 1996; Walmsley et al., 2009). Dentre essas implicações, destaca-se a redução da produtividade florestal em longo prazo, quando são removidos os resíduos de colheita do talhão, pois proporcionam maior exportação dos nutrientes e a redução do COS. O método Feller + Skidder, ao arrastar a árvore inteira para a borda do talhão, de forma não sistematizada, implica na mistura de serapilheira com a camada superficial do solo, e impactam praticamente todo o talhão. Já o método Harvester + Forwarder tem maiores impactos em determinadas ruas do talhão em função do tráfego sistematizado das operações de corte das árvores e baldeio da madeira. No entanto, quando o processamento das árvores ocorre no talhão a camada de resíduos mantida na área reduz a exportação de nutrientes e minimiza os efeitos da compactação (Jesus et al., 2015; Silva et al., 2007b).

Estudos têm demonstrado que determinados compartimentos do COS são mais sensíveis às alterações associadas ao manejo do solo (Faria et al., 2008; Lima et al., 2006; Roscoe e Machado, 2002). Entretanto, quando são considerados períodos curtos de tempo (dias, semanas) entre manejos, a detecção das mudanças no COS fica ainda mais difícil, demandando métodos de avaliação mais sensíveis e precisos como o de fluxos de gases do solo associados a técnicas isotópicas. Trabalhos visando avaliar os impactos do cultivo do eucalipto nos estoques e na qualidade do COS foram realizados (Fialho e Zinn, 2014; Lima et al., 2006; Pegoraro et al., 2012, 2014; Soares et al., 2013), inclusive no que se refere às emissões de GEEs (Vasconcelos, 2014), porém são escassos na literatura os que tratam dos efeitos de métodos de colheita (e efeitos

intrínsecos da destinação dos resíduos florestais) e do preparo do solo para próxima rotação do eucalipto.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto de diferentes métodos de colheita e do preparo do solo para plantio de povoamentos de eucalipto na dinâmica do carbono orgânico do solo por meio dos fluxos de GEEs.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em plantações comerciais de eucalipto localizadas na região de Três Lagoas, Mato Grosso do Sul, em áreas da FIBRIA S.A. O local possui coordenadas geográficas 20°53' S de latitude e 51°44' O de longitude e clima tipo Aw (Köppen), que corresponde ao clima característico do Cerrado brasileiro. Os verões são quentes e úmidos e os invernos são amenos e secos, podendo ocorrer geadas esporádicas nos meses mais frios do ano (Jun-Jul). A temperatura média anual é de 28 °C com totais de chuvas de 900 a 1.400 mm ano⁻¹ e altitude média da região de 350 m. A cobertura vegetal natural é de Cerrado, mas atualmente predominam pastagens plantadas do gênero *Urochloa* (braquiárias), na sua maioria pouco produtiva. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Quadro 1).

Quadro 1. Características físicas e químicas dos solos, em duas posições, nos talhões colhidos com métodos de colheita distintos.

¹ Métodos	Posição	² pH	³ P	³ K	⁴ Ca ⁺²	⁴ Mg ⁺²	⁴ Al ⁺³	⁵ (H+Al)	⁶ MO	Areia	Silte	Argila
			mg dm ⁻³			----- cmol _c dm ⁻³ -----			dag kg ⁻¹	----- % -----		
F+S	Linha	4,58	11,2	53	0,29	0,44	0,98	3,9	1,19	80	3	17
	Entrelinha	4,52	5,5	26	0,2	0,3	0,88	3,4	1,58	80	3	17
H+F	Linha	5,22	2,4	15	0,59	0,62	0	2,4	1,05	85	1	14
	Entrelinha	5,17	2,1	10	0,5	0,73	0	1,8	1,19	80	5	15

¹Métodos de colheita Harvester+Forwarder (H+F) e Feller+Skidder (F+S); ²pH em água - Relação 1:2,5; ³P e K - Extrator Mehlich-1; ⁴Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ - Extrator: KCl 1 mol L⁻¹; ⁵(H+Al) - Extrator Acetato de Cálcio 0,5mol L⁻¹ a pH 7,0; ⁶MO (Matéria Orgânica) = C.Org x 1,724 -Walkley-Black.

Povoamentos próximos de eucalipto cultivados sobre solos semelhantes foram selecionados. Esses talhões eram cultivados com o mesmo clone de eucalipto (híbrido de *Eucalyptusurophylla* x *E. grandis*), estavam no final da primeira rotação (7 anos), e haviam sido implantados em área de pastagens plantadas, cultivadas a mais de 20 anos, anteriormente ocupadas por Cerrado nativo. Os povoamentos de eucalipto foram colhidos com dois métodos de colheita distintos: 1) Feller + Skidder (F+S), em que as

árvores são colhidas inteiras e arrastadas até as bordas do talhão onde são processadas (todo o resíduo da colheita é removido e mantido na borda do talhão) e; 2) Harvester + Forwarder (H+F), em que o corte e processamento das toras são realizados dentro do talhão, deixando os resíduos de colheita em seu interior. Nesse último, a cada quatro linhas colhidas uma fica com o resíduo e as outras três sem resíduo de colheita (folhas, galhos e casca). No caso do atual estudo ambas as condições, com e sem resíduo de colheita, foram amostradas.

Uma vez definidos os talhões do estudo e afim de avaliar o efeito dos métodos de colheita na emissão de GEEs, em setembro de 2013 foram realizadas amostragens de solo e de GEEs antes (pré-colheita) e após a colheita (uma semana após a colheita) com os métodos com Feller + Skidder (F+S) ou Harvester + Forwarder (H+F) nas linhas e entrelinhas das plantas. Em seguida, para avaliar o efeito do preparo do solo dentro de cada método de colheita, por ocasião da reforma das áreas, foram feitas amostragens antes (pré-subsolagem) e um dia após a subsolagem (pós-subsolagem) do solo (somente a entrelinha de planta é subsolada, porém foram amostradas linhas e entrelinhas de plantas). Da avaliação realizada antes da colheita à pós-subsolagem passaram-se aproximadamente três semanas. Em função da elevada concentração de resíduos (folhas, ponteiros e casca) em determinadas linhas nas áreas colhidas com o método H+F, também foram instaladas câmaras para coleta de GEEs nas linhas com resíduos de colheita (CR) e nas linhas sem resíduos de colheita (SR).

O delineamento experimental utilizado foi o de medidas repetidas no tempo, com oito repetições.

Para a determinação dos GEEs foram instaladas, após cada manejo do solo (pré-colheita, pós-colheita e subsolagem), oito câmaras estáticas (anéis de PVC com 20 cm de altura e 500 mm de diâmetro) no solo até 5 cm de profundidade. Essas câmaras foram posicionadas tanto nas linhas quanto nas entrelinhas de plantas. No momento da amostragem as câmaras foram fechadas com tampas de PVC dotadas de septo de borracha na parte superior, o que restringe a passagem de ar do solo para a atmosfera, de modo que as mudanças de concentração dos GEEs pudessem ser medidas ao longo do tempo de coleta. Os gases (CO₂ e CH₄) foram coletados nos intervalos de 0, 10, 20, 40 minutos, após o fechamento das câmaras, utilizando seringas de 60 mL equipadas com válvulas “three-way” para posterior leitura das concentrações de CO₂, CH₄ e da razão isotópica do C-CO₂ ($\delta^{13}\text{C-CO}_2$) por meio de Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS - Picarro, Sunnyvale, CA).

Para a determinação das concentrações de N₂O foram coletadas amostras de gases do solo, nas mesmas câmaras previamente instaladas, nos intervalos de 0, 15, 30, 60 minutos. Após o fechamento das câmaras, com seringas de 10 mL, coletou-se os gases, que foram armazenados em tubos de vidro pré-evacuados para posterior quantificação em cromatógrafo gasoso equipado com espectrômetro de massas (GCMS-QP2010 SE – Shimadzu Corporation). A determinação das concentrações do N₂O foi obtida segundo Ekeberg et al. (2004).

A seguinte equação foi utilizada para o cálculo do fluxo dos GEEs (Smith e Conen, 2004):

$$\text{Fluxo dos gases (mg m}^{-2}\text{h}^{-1}) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} * M * \frac{(P * V)}{(R * T)} * \frac{1}{A} * 3,6$$

Em que:

$\Delta Q/\Delta t$: coeficiente angular (ppm/s), obtido do ajuste das concentrações dos gases ao longo do tempo de coleta pré determinado;

M: massa molar do gás (g/mol);

P: pressão constante de 1 atm;

V: volume da câmara (L);

R: constante dos gases (0,08205746);

T: temperatura do solo (K);

A: área da câmara (m²).

A temperatura (°C) e a umidade (%) superficial do solo (0-5 cm) foram medidas por meio do sensor EC-5 (Decagon Devices Inc., Pullman, WA) no momento da coleta dos gases.

Com base nos valores de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ e das concentrações de CO₂ medido, foi utilizado o modelo de mistura de massas desenvolvido por Keeling (1958), denominado “*KeelingPlot*” para determinar o $\delta^{13}\text{C}$ do C respirado no solo.

A proporção do $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ oriundo das plantas C4 (plantas com ciclo de carboxilação C4) foi calculada de acordo com (Vitarello et al., 1989):

$$\% \text{CCO}_2 \text{ C4} = \frac{(\delta^{13}\text{CCO}_2 - \delta_0)}{(\delta_p - \delta_0)} * 100$$

Em que:

% CCO₂ C₄: proporção de C-CO₂ evoluído do solo oriundo de espécies de C₄;

δ¹³CCO₂: abundância natural de ¹³C-CO₂ evoluído do solo;

δ₀: abundância natural média de ¹³C derivado do solo de um cerrado nativo atual adjacente à área experimental (-26 ‰);

δ_p: abundância natural média de ¹³C derivado de pastagens (-13‰).

Ao calcular %CCO₂ C₄ de uma pastagem adjacente (δ¹³C-CO₂ C₄ = -15‰) à área experimental, verifica-se que aproximadamente 16% do δ¹³C-CO₂ ainda é de cerrado nativo. Diante disso, pode-se calcular a percentagem de δ¹³C-CO₂ oriundo do eucalipto plantado na área de acordo com a equação:

$$\% \text{CCO}_2 \text{ Euc.} = 100 - \% \text{CCO}_2 \text{ C}_4 - \% \text{CCO}_2 \text{ C}_3 \text{ Nat.}$$

Em que:

% CCO₂ Euc.: proporção de C-CO₂ evoluídos do solo oriundos do eucalipto;

% CCO₂ C₃ Nat.: proporção de C-CO₂ evoluídos do solo oriundos do Cerrado nativo.

Em cada área foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas. Na camada de 0-10 cm de profundidade para determinação da densidade do solo (DS) e na camada de 0-20 para as análises físicas e químicas do solo.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias submetidas ao teste de Tukey a 5% de probabilidade.

RESULTADOS

Não foram observados aumentos nas concentrações de N₂O do solo ao longo do tempo de coleta independente dos métodos de colheita e preparo do solo. O valor médio (para todos os tratamentos) da concentração N₂O no solo foi de 0,42 ppm.

Efeito dos métodos de colheita na emissão dos GEEs

Foi verificado efluxo de CO₂ do solo para a atmosfera em todos os tratamentos (Figura 2). Embora isso ocorra, há diferenças substanciais entre as emissões de gases dos solos em relação ao método de colheita e a posição avaliada. Nas linhas de planta é

observado maior efluxo de CO₂ do solo quando comparados àqueles da entrelinha. Cabe ressaltar as maiores ($p < 0,05$) emissões de CO₂ do solo, na linha de planta, onde o eucalipto foi colhido com o método F+S em relação à pré-colheita e ao H+F (Figura 2). Já na entrelinha de planta as áreas colhidas com H+F e F+S apresentam maior efluxo de CO₂ ($p < 0,05$) quando comparados à pré-colheita (Figura 2).

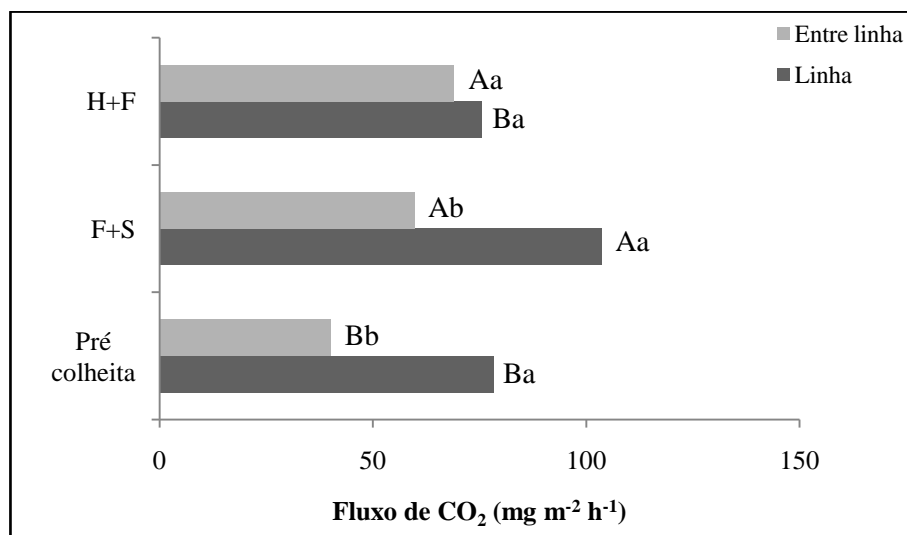


Figura 2. Média do fluxo de CO₂ de solo sob povoamento de eucalipto, medidos na linha e entrelinha de plantas, na pré-colheita e pós-colheita, com os métodos Harvester + Forwarder (H+F) ou Feller + Skider (F+S). Médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem quanto ao método de colheita do eucalipto dentro de uma mesma posição pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra minúsculas não diferem entre si quanto à posição de amostragem, dentro de um mesmo método de colheita pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Independente do método de colheita e da posição de amostragem adotado foi observado influxo de CH₄ da atmosfera para o solo (Quadro 2). No entanto, os diferentes métodos de colheita não afetam o influxo de CH₄ para o solo, nem os valores de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ evoluído do solo. Verifica-se que a maior proporção do C-CO₂ evoluído do solo advém do eucalipto tanto na pré-colheita quanto na pós-colheita, com exceção da pré-colheita na posição entrelinha (Quadro 2).

Antes da colheita mecanizada (pré-colheita) não foram verificadas diferenças para a densidade do solo (Ds) quanto à posição de amostragem (linhas e entrelinha). Já após a colheita, para ambos os métodos, a posição de amostragem tem efeito significativo ($p < 0,05$) na Ds (Figura 3). Ao contrário do observado para o CO₂, verificam-se maiores valores de Ds nas entrelinhas de planta para todos os tratamentos se comparados com aqueles das linhas. O solo da área colhida com o método F+S

apresenta os maiores valores ($p < 0,05$) de D_s , tanto nas linhas quanto nas entrelinhas de planta, quando comparado àqueles da pré-colheita e área colhida com H+F.

Quadro 2. Temperatura (Temp), umidade, fluxo de CH_4 , composição isotópica do C- CO_2 ($\delta^{13}C-CO_2$) e proporção de C- CO_2 evoluído (C4 – pastagem e C3 Euc. – eucalipto) do solo sob eucalipto (linha e entrelinha) colhido com diferentes métodos de colheita.

Método de colheita	Posição	Temp	Umidade	CH_4	$\delta^{13}C-CO_2$	% CCO_2_{C4}	% $CCO_2_{C3 Euc.}$
		°C	%	mg m ⁻² h ⁻¹	‰	----- % -----	
Pré colheita	Linha	26,5	7,6	-0,041 Aa	-22,4 Aa	28	56
	Entrelinha	26,8	7,9	-0,026 Aa	-19,4 Aa	51	33
F+S	Linha	32,4	7,1	-0,044 Aa	-23,3 Aa	21	63
	Entrelinha	32,8	6,1	-0,037 Aa	-22,4 Aa	28	56
H+F	Linha	32,6	7,0	-0,044 Aa	-24,0 Aa	15	69
	Entrelinha	33,8	6,3	-0,043 Aa	-23,1 Aa	22	62

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem quanto ao método de colheita do eucalipto dentro de uma mesma posição pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si quanto à posição de amostragem, dentro de um mesmo método de colheita pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Efeito do preparo do solo na emissão dos GEEs em área colhida com Feller+Skidder

Dentro de cada método de colheita foram observadas diferenças ($p < 0,05$) para o preparo do solo para plantio e para as posições de amostragem nos efluxos de CO_2 do solo (Figura 4). Ao avaliar o preparo do solo observou-se que os fluxos de CO_2 são maiores na linha de plantio na pré-subsolagem, quando comparado à pós-subsolagem. No entanto, o inverso é notado quando é considerada a entrelinha de planta (Figura 4). Quando são consideradas as posições de amostragem notou-se que no solo antes da subsolagem (pré-subsolagem) os efluxos de CO_2 na entrelinha equivalem a apenas 60 % dos efluxos de CO_2 na linha de plantio. Porém esses valores invertem quanto à posição após ter sido realizado a subsolagem (Figura 4). Para o $\delta^{13}C-CO_2$ evoluído do solo verifica-se que foi afetado pelo preparo do solo na linha de planta (Quadro 3). Esse valor é menor (-23,3 ‰) no solo na pré-subsolagem, aumentando para -18,8 ‰ no solo pós-subsolagem, o que altera a proporção do % $CCO_2_{C3 Euc.}$ e % CCO_2_{C4} .

Verifica-se que, mesmo após a subsolagem, há influxo de CH_4 para o solo independentemente da posição de amostragem (Quadro 3), que por sua vez não diferem ($p < 0,05$) entre si.

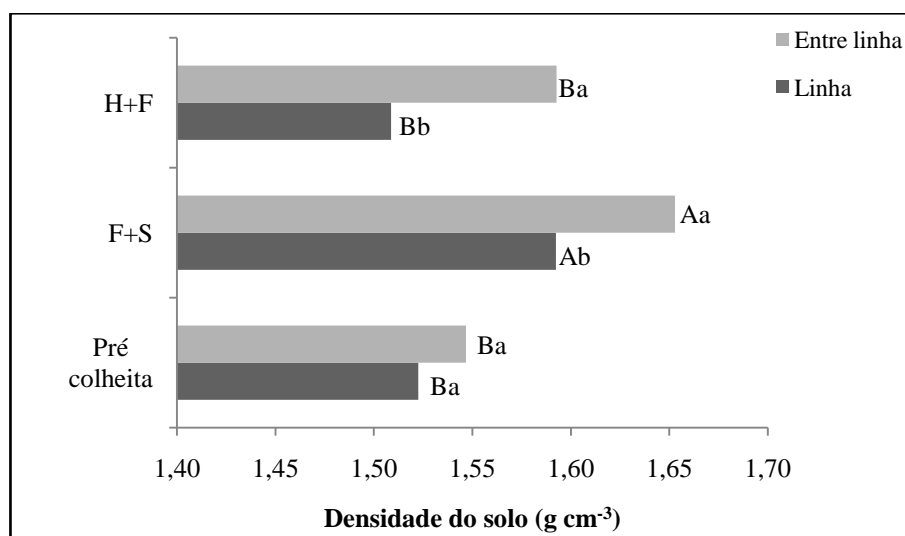


Figura 3. Densidade do solo sob povoamento de eucalipto medida nas linhas e entrelinhas de plantio na pré e pós-colheita com os métodos Harvester+Forwarder (H+F) ou Feller+Skider (F+S). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem quanto ao método de colheita do eucalipto, dentro de uma mesma posição, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si quanto à posição de amostragem, dentro de um mesmo método de colheita, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

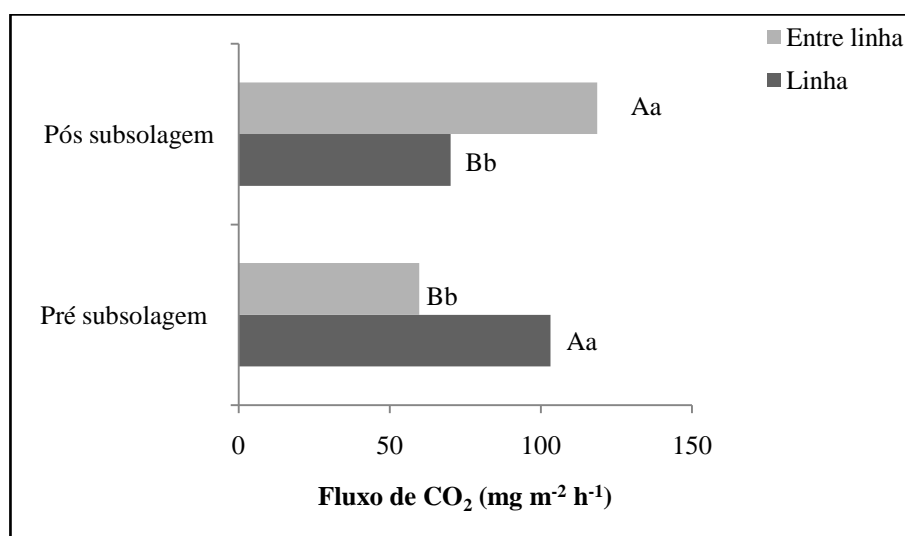


Figura 4. Média dos fluxos de CO₂ de solo sob povoamento de eucalipto medidos nas linhas e entrelinhas de plantas na pré-subsolagem e após a subsolagem em áreas colhidas com Feller + Skider (F+S). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem quanto ao preparo do solo para plantio do eucalipto, dentro da mesma posição, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si quanto à posição de amostragem, dentro de um mesmo preparo do solo, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Efeito do preparo do solo e dos resíduos na emissão dos GEEs em área colhida com Harvester+Forwarder

Independente da presença do resíduo da colheita (sem resíduo-SR e com resíduo-CR) e da posição avaliada (linha ou entrelinha), após a subsolagem ocorreu acréscimo de, no mínimo, 65 % nos efluxos de CO₂ do solo se comparado ao mesmo

tratamento na pré-subsolagem (Figura 5). Assim como o preparo do solo, a presença do resíduo da colheita só apresentou diferenças ($p < 0,05$) para os efluxos de CO_2 do solo na pós-subsolagem. Constatou-se que o solo CR na entrelinha de planta (local onde se realizou a subsolagem após a colheita) apresentou os maiores efluxos de CO_2 ($201,43 \text{ mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$), diferindo quanto ao solo SR e quanto a posição dentro do tratamento CR. No entanto, o solo SR apresentou maiores efluxos de CO_2 na linha de planta quando comparado ao CR, não diferindo quanto a posição dentro do tratamento SR.

Quadro 3: Temperatura, umidade, fluxo de CH_4 e composição isotópica do C- CO_2 ($\delta^{13}\text{C-CO}_2$) nos solos sob eucalipto (linha e entrelinha) colhido com Feller+ Skidder antes e após preparo do solo para plantio.

Manejo	Posição	Temp	Umidade	CH_4	$\delta^{13}\text{C-CO}_2$	% CCO_2C_4	% $\text{CCO}_2\text{C}_3\text{Euc.}$
		$^{\circ}\text{C}$	m^3m^{-3}	$\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$	‰	----- % -----	
Pré-subsolagem	Linha	32,4	7,1	-0,044 Aa	-23,3 Aa	21	63
	Entrelinha	32,8	6,1	-0,037 Aa	-22,4 Aa	28	56
Pós-subsolagem	Linha	40,7	11,0	-0,037 Aa	-18,8 Ba	55	29
	Entrelinha	40,5	12,8	-0,052 Aa	-19,3 Aa	52	32

Temp: Temperatura da superfície do solo. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem quanto ao método de colheita do eucalipto, dentro de uma mesma posição, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si quanto à posição de amostragem, dentro de um mesmo método de colheita, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O preparo do solo proporcionou diferenças nos valores de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ somente na condição SR e na entrelinha de planta (local onde se realizou a subsolagem), que variaram de -22,1 a -26,8 ‰, com os menores valores (mais negativos) sendo observados para o solo do tratamento CR (Quadro 4). Isso é comprovado pela alteração na proporção do % $\text{CCO}_2\text{C}_3\text{Euc.}$ e % CCO_2C_4 .

Similarmente ao observado no solo da área colhida com F+S, o preparo do solo em área colhida com o método H+F também proporcionou influxos de CH_4 da atmosfera para o solo independente da presença de resíduos e da posição avaliada (Quadro 4). Esses influxos variaram de -0,024 a -0,084 $\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$. Apesar dos baixos valores de influxo de CH_4 quando comparado às emissões de CO_2 , foi observado diferenças ($p < 0,05$) entre os preparos de solo, presença dos resíduos de colheita e das posições avaliadas (Quadro 4). Após a subsolagem ocorreram maiores influxos de CH_4 quando comparados ao solo na pré-subsolagem, independente da presença dos resíduos de colheita, sendo detectadas diferenças ($p < 0,05$) somente nas linhas de planta. Quando se avaliou o efeito da presença dos resíduos de colheita (SR e CR) verificou-se os maiores influxos de CH_4 nos solos SR, independente se da fase pré- ou pós-

subsolagem (Quadro 4). Quanto à posição de amostragem todos os tratamentos diferem entre si ($p < 0,05$) quanto ao influxo de CH_4 , exceto no tratamento pós-subsolagem e CR.

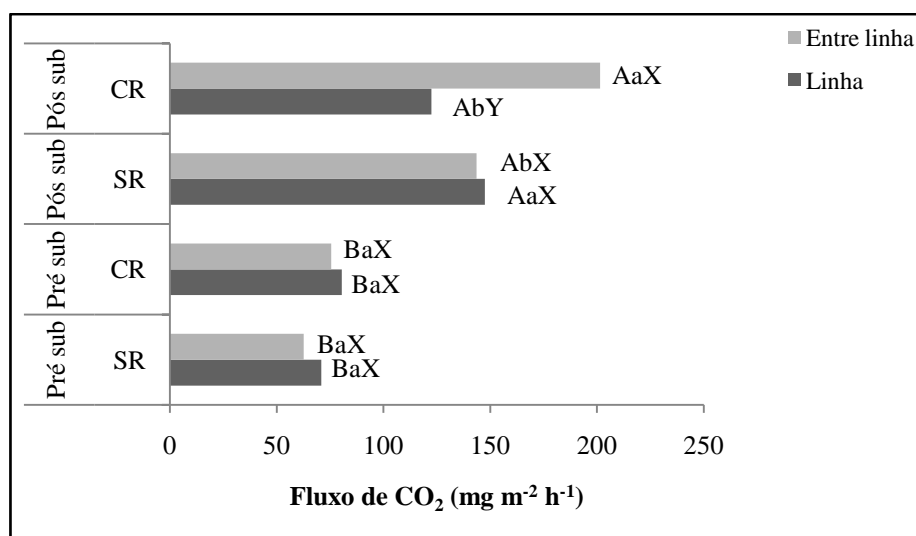


Figura 5. Fluxo de CO_2 do solo sob povoamento de eucalipto medido na linha e na entrelinha de plantas na pré-subsolagem (Pré sub) e pós-subsolagem (Pós sub), manejados com resíduos da colheita (CR) e sem resíduos da colheita (SR) em áreas colhidas com Harvester+Forwarder (H+F). Médias seguidas por letras maiúsculas (A, B) iguais não diferem quanto ao preparo do solo para plantio do eucalipto dentro de uma mesma posição pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras minúsculas (a, b) iguais não diferem entre si quanto ao manejo de resíduos da colheita dentro de um mesmo preparo do solo e posição de amostragem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas (X, Y) iguais não diferem entre si quanto à posição de amostragem, dentro de um mesmo preparo do solo e manejo de resíduos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quadro 4. Temperatura (Temp), umidade, fluxo de CH_4 e composição isotópica do C- CO_2 ($\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$) nos solos sob eucalipto (linha e entrelinha) colhido com Harvester+Forwarder antes e após preparo do solo para plantio e manejados com (CR) e sem (SR) resíduos da colheita.

Manejo	Condição	Posição	Temp	Umidade	CH_4	$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$	% CCO_2C_4	% CCO_2C_3 Euc.
			°C	%	mg m ⁻² h ⁻¹	‰	----- % -----	
Pré-sub	SR	Linha	34,1	6,9	-0,065 BaX	-23,8 AaX	17	67
		Entrelinha	35,9	5,6	-0,037 AaY	-22,1 BaX	30	54
	CR	Linha	31,1	7,2	-0,024 BbY	-24,3 AaX	13	71
		Entrelinha	31,8	7,1	-0,049 AaX	-24,1 AaX	15	69
Pós-sub	SR	Linha	28,7	9,7	-0,084 AaX	-24,4 AaX	12	72
		Entrelinha	35,2	9,9	-0,041 AaY	-26,8 AaX	0	84
	CR	Linha	28,7	11,7	-0,064 AbX	-25,7 AaX	2	82
		Entrelinha	32,2	7,8	-0,051 AaX	-27,4 AaX	0	84

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (A, B) não diferem quanto ao preparo do solo para plantio do eucalipto, dentro de uma mesma posição, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra minúscula (a, b) não diferem entre si quanto ao manejo de resíduos da colheita, dentro de um mesmo preparo do solo e posição de amostragem, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (X, Y) não diferem entre si quanto à posição de amostragem, dentro de um mesmo preparo do solo e manejo de resíduos, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

DISCUSSÃO

As concentrações de N₂O determinadas nas câmaras estáticas ao longo do tempo de coleta foram similares para os solos de todos os tratamentos, com valores baixos e semelhantes àquele do background da atmosfera que está em torno de 0,33 ppm (IPCC, 2013). Isso indica que as emissões de N₂O em plantios de eucalipto, nesses solos de Cerrado, avaliados ao final do primeiro ciclo, após a operação de colheita e até mesmo do preparo do solo, não são uma preocupação. Porém, não há também indícios de sequestro (influxo líquido) desse gás pelo solo. Cabe ressaltar, no entanto, que estudos futuros deverão ser conduzidos para avaliar os efeitos da aplicação de fertilizantes em cobertura, especialmente aqueles contendo N, nas emissões de GEEs, em particular o N₂O, visto que pesquisas mais recentes com outras culturas (Butterbach-Bahl et al., 2013) têm demonstrado que eles podem aumentar significativamente suas emissões.

Efeito dos métodos de colheita na emissão dos GEEs

A emissão de CO₂ do solo para a atmosfera ocorre devido a processos biológicos, como decomposição de compostos orgânicos e respiração do sistema radicular das plantas (D'Andrea, 2004). Normalmente, a concentração de CO₂ nos poros do solo é maior que na atmosfera devido à presença de raízes e organismos. Isso acarreta em fluxo difusivo ascendente do gás das camadas mais profundas até a superfície do solo (Ball e Smith, 1991), o que explica o efluxo líquido de CO₂ do solo para atmosfera em todos os solos sob os diferentes manejos estudados.

Os maiores efluxos de CO₂ do solo foram encontrados nas linhas de plantio, provavelmente devido a maior concentração de raízes nessa região (Paulino et al., 2003), quando comparado a entrelinha. A maior liberação de CO₂ do solo na linha de plantas pode estar associada às maiores concentrações de microrganismos próximos as raízes, devido aos exsudados radiculares e fontes mais lábeis de C que são utilizadas como fonte de energia (Bertin et al., 2003). No entanto, é mais provável que esteja relacionada com a maior contribuição autotrófica (respiração radicular) na emissão de CO₂ para atmosfera. Recentemente Vasconcelos (2014), em pesquisa realizada com eucalipto, em talhões próximos aos do atual estudo, considerando a variação da abundância natural do CO₂ evoluído do solo, verificou que há maior contribuição da respiração autotrófica do que da heterotrófica (respiração microbiana) para o total de CO₂ evoluído do solo, especialmente na estação chuvosa.

No método de colheita F+S, o equipamento de baldeio (Skidder) arrasta os feixes de árvores inteiras até as bordas do talhão. Como esse transporte não ocorre em linhas definidas (como o Forwarder) este causa distúrbio no talhão, em especial às camadas superficiais do solo, que são desagregadas e misturadas com a camada de serapilheira, acelerando sua decomposição, aumentando assim as emissões de CO₂ pelo solo. Esse processo é agravado nas linhas de planta, onde encontram-se as cepas das árvores recém colhidas, pois o dano causado nas cepas proporciona a morte das raízes finas e conseqüentemente libera fontes de C para os microrganismos potencializando os efluxos de CO₂ do solo. O mesmo não acontece com o solo no método de colheita H+F, pois o tráfego das máquinas e o baldeio das toras é realizado na entrelinha de plantas.

Com base nos dados de densidade do solo (Ds) é possível inferir maior dano causado ao solo nas linhas e entrelinhas de plantas pelo método de colheita F+S. A compactação resulta na quebra de agregados e acelera a taxa de decomposição do COS (Silva et al., 2011), que já é alta na maioria dos solos dessa região. Aliado a isso, os efeitos negativos da compactação refletem em menor porosidade, maior resistência a penetração de raízes e menor taxa de infiltração de água, que se não forem adequadamente mitigadas, podem comprometer a sustentabilidade da produtividade florestal (Jesus et al., 2015; Silva et al., 2008). Por outro lado uma leve compactação desses solos arenosos do Cerrado pode favorecer a retenção de água e provocar efeito benéfico às plantas. No entanto, há a tendência do tráfego dos rodados do maquinário ser nas entrelinhas de plantas, já que as cepas dificultam o traslado, justificando assim as maiores Ds nas entrelinhas dentro de cada manejo.

Já para os influxos de CH₄, Le Mer e Roger (2010) e Saggar et al. (2008) relatam que o influxo de CH₄ para o solo é ocasionado por bactérias metanotróficas que oxidam o CH₄ e o utilizam como fonte de C e energia. Esse potencial de sequestrar CH₄ pelos microrganismos é potencializado em solo arenoso por oferecer melhores condições de aeração (Boeckx et al., 1997), o que provavelmente acontece no atual estudo. Segundo Jacinthe e Lal (2005) solos que sofreram algum tipo de manejo necessitam de décadas para restabelecer parcialmente a capacidade de oxidação do CH₄. Porém, no atual estudo os métodos de colheita do eucalipto não alteraram essa capacidade do solo em sequestrar CH₄ quando comparados à pré-colheita, ou seja, o impacto das atividades de colheita (corte e baldeio) do eucalipto não causou ($p > 0,05$) danos à comunidade de bactérias metanotróficas do solo em relação à difusão do CH₄.

Efeito do preparo do solo na emissão dos GEEs em área colhida com Feller+Skidder

O dano causado às cepas e ao sistema radicular durante a colheita das árvores e o baldeio justificam os maiores efluxos de CO₂ do solo na linha de planta na pré-subsolagem (Figura 4). Em um primeiro momento após a colheita há ativação do metabolismo microbiano devido a fontes de C prontamente disponíveis pela morte das raízes finas (Mello et al., 2007) e o consequente aumento do efluxo de CO₂ do solo para atmosfera. Porém, após a subsolagem (curto período de tempo após a colheita) verifica-se a diminuição do efluxo de CO₂ do solo na linha de planta, provavelmente devido à redução dessas fontes mais acessíveis aos microrganismos. Após a colheita do eucalipto, até aproximadamente 60 dias há morte e redução da densidade de raízes finas, que retomam o crescimento posteriormente (Mello et al., 2007; Teixeira et al., 2002). De acordo com Janssens et al. (2002) as raízes finas precisam ser substituídas frequentemente para assegurar o funcionamento do sistema radicular.

Após a subsolagem, no entanto, o revolvimento do solo expõe o COS antes protegido no interior dos agregados do solo ao ataque e decomposição pelos microrganismos (La Scala et al., 2005) e, conseqüentemente, proporciona os maiores efluxos de CO₂ do solo na entrelinha de planta, linha de preparo do solo. Isso fica evidente pelos valores menos negativos do $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ evoluídos do solo após a subsolagem (-18,8 e -19,3‰) quando comparados aos $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ da pré-subsolagem (-23,3 e -22,4 ‰), respectivamente, na linha e na entrelinha de plantas. Esses valores de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ refletem a fonte/substrato do qual o C derivou (Balesdent e Mariotti, 1987), ou seja, valores menos negativos são indicativos que o C-CO₂ é originário de compostos carbonados derivados de plantas de ciclo de carboxilação C₄ (Machado et al., 2011; Alves et al., 2005). Como a área de eucalipto (rota fotossintética C₃) em estudo encontrava-se no final da primeira rotação e havia sido implantada em área ocupada anteriormente por pastagem plantada de braquiária (rota fotossintética C₄), fica evidente que boa parte do CO₂ emitido pelo solo após a subsolagem e que estava preservado no interior dos agregados era de um COS mais antigo, derivado da pastagem. A %CCO₂ C₄ passa a contribuir, em média, para o C-CO₂ evoluído do solo de 24,5 para 53,5% da Pré para Pós-subsolagem, respectivamente. Esforços devem ser colocados no sentido de minimizar a desagregação do solo durante a realização de atividades silviculturais visando minimizar as perdas de COS.

Já para os fluxos de CH₄, o preparo do solo na área colhida com o método F+S não alterou os influxos líquidos de CH₄.

Efeito do preparo do solo e dos resíduos na emissão dos GEEs em área colhida com Harvester+Forwarder

O preparo do solo e o manejo dos resíduos normalmente afetam as taxas metabólicas dos microrganismos nos processos de decomposição dos resíduos vegetais e do COS (Jesus et al., 2015), o que pode resultar no aumento do efluxo líquido de CO₂ para a atmosfera e a consequente diminuição dos estoques de COS. Geralmente, a atividade decompositora dos microrganismos atinge valores elevados no período imediatamente posterior ao revolvimento do solo, decrescendo posteriormente à atividade basal pré-existente, devido à redução das frações orgânicas de fácil decomposição (Paul e Clark, 1996; La Scala et al., 2006). Contudo, com o aporte de C ao solo via resíduos da colheita do eucalipto essas perdas de C via respiração do solo podem ser contrabalanceadas.

A subsolagem aumentou o fluxo de CO₂ do solo independente da presença de resíduos de colheita, mas o efeito foi maior na presença dos mesmos. Esse efeito foi maior no tratamento CR e na entrelinha de plantas, onde foi feita a passada do subsolador. O efeito da subsolagem no aumento das emissões de CO₂ foi de maior magnitude do que a manutenção ou não dos resíduos. Tal efeito após a subsolagem deve estar relacionado com a exposição do solo e a otimização do contato do resíduo de colheita e o solo (promovido pela subsolagem na entrelinha), disponibilizando fontes de C mais prontamente decomponíveis para os microrganismos, potencializando as emissões de CO₂ do solo para atmosfera (Costa et al., 2008; Vargas e Scholles, 2000). A tendência de se encontrar valores mais negativos para o $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ e a maior proporção do $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ C₃ Euc. nos solos após a subsolagem suporta tal hipótese, uma vez que quando a colheita é feita com o H+F não há uma mistura tão acentuada do solo superficial com a camada de litter e resíduos de colheita ($\delta^{13}\text{C-CO}_2$ menos negativos na pré-subsolagem) como ocorre quando da colheita com F+S. Na área colhida com o H+F essa mistura ocorre principalmente na entrelinha de plantas por ocasião da operação de preparo do solo para o plantio (pós-subsolagem), resultando em $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ mais negativos e mais próximos daqueles dos materiais derivados do eucalipto. Adicionalmente, esses dados levam a inferir que quando a área foi colhida com H+F a operação de subsolagem subsequente resultou em menores perdas de COS mais antigo,

derivada da pastagem, sugerindo efeito favorável do uso desse método de colheita para a manutenção do COS. A menor compactação (e desagregação do solo) observada após a colheita com H+F antes da subsolagem (Figura 3) pode estar contribuindo para tal fato.

O manejo do solo com subsolador melhora as condições de aeração do solo e favorece o influxo líquido de CH₄ para o solo. Porém, nota-se que onde há acúmulo de resíduo de colheita (CR) menores influxos de CH₄ para o solo são verificados. Isso se deve pelo fato do acúmulo de resíduos proporcionar maior umidade do solo, que altera a aeração do solo e a ação dos microrganismos responsáveis pelo dreno de CH₄ (Boeckx et al., 1997). Maiores influxos de CH₄ verificados nas linhas de planta quando comparados a entrelinha provavelmente se devem à maior atividade de microrganismos metanotróficos próximos às raízes favorecidos pelos exsudados radiculares na rizosfera.

CONCLUSÕES

O preparo do solo para plantio do eucalipto, por meio da subsolagem, proporciona maiores perdas de COS, na forma de CO₂, inclusive do C-CO₂ oriundo do COS de pastagens protegidos nos agregados do solo.

O método de colheita Feller+Skidder promove maiores emissões de CO₂ do solo quando comparado ao método de colheita Harvester+Forwarder.

A colheita do eucalipto com os métodos Feller+Skidder e Harvester+Forwarder, o preparo do solo e o manejo dos resíduos da colheita não afetam negativamente os influxos líquidos de CH₄ para o solo.

As emissões de N₂O em plantios de eucalipto em solos de Cerrado ao final do primeiro ciclo, após manejo de colheita e preparo do solo, não são uma preocupação, porém não há também indícios de sequestro desse gás.

Agradecimentos

À empresa Fibria, especialmente ao pesquisador Luiz Otávio de Oliveira Ramos e técnicos de pesquisa Claudiney e Ronivon, pelo apoio irrestrito e pela área cedida para realização do experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves BJR, Zotarelli L, Jantalia CP, Boddey RM, Urquiaga S. **Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo planta.** In:

Aquino AM, Assis RL. Processos biológicos no sistema solo-planta: Ferramentas para uma agricultura sustentável. Brasília, Embrapa-SCT, 2005. p.343-350.

Ampoorter E, Nevela LV, Vosb BD, Hermyc M, Verheyen K. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. **Forest Ecology and Management**, v. 260, n. 10, p. 1664–1676, 2010.

Ball BC, Smith KA. **Gas movement**. In: Smith KA, Mullins CE. Soil analysis: Physical methods. New York, Marcel Dekker, 1991. p.511-549.

Balesdent J, Mariotti A. Natural ¹³C Abundance of Soil Organic as a Tracer for Studies of Soil Organic Matter Dynamics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 1, p. 25–30, 1987.

Bellote AFJ, Dedecek RA, Silva HD. Nutrientes minerais, biomassa e deposição de serapilheira em plantio de Eucalyptus com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 56, n. 1, p. 31–41, 2008.

Bertin C, Yang X, Weston LA. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. **Plant and Soil**, v. 256, n. 1, p. 67–83, 2003.

Boeckx P, Van Cleemput O, Villaralvo I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.49, p. 91–95, 1997.

Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Zechmeister-Boltenstern S. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 368, n. 1621, p. 20130122, 2013.

Clarke N, Gundersen P, Jönsson-Belyazid U, Kjønnaas OJ, Persson T, Sigurdsson BD, Stupak I, Vesterdal L. Influence of different tree-harvesting intensities on forest soil carbon stocks in boreal and northern temperate forest ecosystems. **Forest Ecology and Management**, v. 351, p. 9–19, 2015.

Costa FDS, Bayer C, Zanatta JA, Mielniczuk J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 323–332, 2008.

D'ANDREA, A. F. **Fluxo de CO₂ do solo em áreas com cafeeiros e povoamentos florestais** [tese]. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004. 97 p.

Ekeberg D, Ognér G, Fongén M, Joner EJ, Wickström T. Determination of CH₄, CO₂ and N₂O in air samples and soil atmosphere by gas chromatography mass spectrometry, GC-MS. **Journal of environmental monitoring**, v. 6, n. 7, p. 621–3, 2004.

Faria GE, Barros NF, Novais RF, Silva IR, Neves JCL. Carbono orgânico total e frações da matéria orgânica do solo em diferentes distâncias do tronco de eucalipto. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 80, p. 265–277, 2008.

Fenner PT. **Compactação do solo**. In: Fenner PT. Colheita Florestal. Viçosa:

Universidade Federal de Viçosa, 2002. p. 375-396.

Fialho RC, Zinn YL. Changes in Soil Organic Carbon Under Eucalyptus Plantations in Brazil: A Comparative Analysis. **Land Degradation & Development**, v. 25, n. 5, p. 428–437, 2014.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: the physical science basis. [Acesso em: 01 de março de 2016]. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

Jacinthe PA, Lal R. Labile carbon and methane uptake as affected by tillage intensity in a Mollisol. **Soil and Tillage Research**, v. 80, n. 1-2, p. 35–45, 2005.

Janssens IA, Sampson DA, Curiel-Yuste J, Carrara A, Ceulemans R. The carbon cost of fine root turnover in a Scots pine forest. **Forest Ecology and Management**, v. 168, n. 1-3, p. 231–240, 2002.

Jesus GL, Silva IR, Almeida LFJ, Santos MA, Leite FP, Neves JCL. Produtividade do eucalipto, atributos físicos do solo e frações da matéria orgânica influenciadas pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1190–1203, 2015.

Keeling CD. The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere. **Tellus**, v. 13, n. 2, p. 322–334, 1958.

La Scala NN, Lopes A, Panosso AR, Camara FT, Pereira GT. Soil CO₂ efflux following rotary tillage of a tropical soil. **Soil and Tillage Research**, v. 84, n. 2, p. 222–225, 2005.

La Scala N, Bolonhezi D, Pereira GT. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 91, n. 1-2, p. 244–248, 2006.

Lal, R. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools. **Energy and Environmental Science**, London, v. 1, p. 86-100, 2008.

Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. **Europe Journal Soil Biol.**, v. 37, n. 2001, p. 25–50, 2001.

Lima AMN, Silva IR, Neves JCL, Novais RF, Barros NF, Mendonça ES, Smyth TJ, Moreira MS, Leite FP. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 235, n. 1-3, p. 219–231, 2006.

Machado DN, Novais RF, Silva IR, Loureiro ME, Milagres JJ, Soares BEM. Enriquecimento e alocação de ¹³C em plantas de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 3, p. 857–866, 2011.

Mello SL, Gonçalves JLM, GAVA JL. Pre- and post-harvest fine root growth in Eucalyptus grandis stands installed in sandy and loamy soils. **Forest Ecology and**

Management, v. 246, n. 2-3, p. 186–195, 2007.

Merino A, Balboa MA, Soalleiro RR, Gonzalez JGA. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. **Forest Ecology and Management**, v. 207, n. 3, p. 325–339, 2005.

Nave LE, Vance ED, Swanston CW, Curtis PS. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 5, p. 857–866, 2010.

Olsson BA, Bengtsson J, Lundkvist H. Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils. **Forest Ecology and Management**, v. 84, n. 1-3, p. 135–147, 1996.

Paul EA, Clark FE. **Soil microbiology and biochemistry**. 2.ed. San Diego, Academic Press, 1996. 340p.

Paulino AF, Medina CC, Neves CSVJ, Azevedo MCB, Higa AR, Simon A. Distribuição do sistema radicular de árvores de acácia-negra oriundas de mudas produzidas em diferentes recipientes. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 605–610, 2003.

Pegoraro RF, Silva IR, Novais RF, Barros NF, Fonseca S. Biomarcadores derivados de planta e de microrganismos em solos de tabuleiros costeiros cultivados com eucalipto e acácia. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 725–738, 2012.

Pegoraro RF, Silva IR, Novais RF, Cantarutti RB, Fonseca S. Estoques de carbono e nitrogênio em argissolo submetido ao monocultivo de eucalyptus urograndis e em rotação com acacia mangium. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 933–943, 2014.

Repo A, Kankanen R, Tuovinen JP, Antikainen R, Tuomi M, Vanhala P, Liski J. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 4, n. 2, p. 202–212, 2012.

Roscoe R, Machado PLOA. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 86p.

Saggar S, Tate KR, Giltrap DL, Singh J. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide and methane in New Zealand terrestrial ecosystems and their mitigation options: A review. **Plant and Soil**, v. 309, n. 1-2, p. 25–42, 2008.

Seixas F. **Olho na Terra**. Rev. Cultivar Máq., 2:15-17, 2002.

Silva AR, Dias Junior MS, Leite FP. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 89–93, 2007a.

Silva SR, Barros NF, Costa LM, Mendonça ES, Leite FP. Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um “Forwarder” nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 2, p. 371–377, 2007b.

Silva SR, Barros NF, Costa LM, Leite FP. Soil compaction and eucalyptus growth in

response to forwarder traffic intensity and load. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 3, p. 921–932, 2008.

Silva SR, Silva IR, Barros NF, Mendonça ES. Effect of compaction on microbial activity and carbon and nitrogen transformations in two oxisols with different mineralogy. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1141–1149, 2011.

Smith KA, Conen F. **Measurement of Trace Gases, I: Gas analysis, Chamber Methods, and Related Procedures**. In: Soil and Environmental Analysis: Modern Instrumental Techniques. 3 ed. New York, 2004. 576 p.

Soares EMB, Silva IR, Novais RF, Hu YY, Schmidt-Rohr K. Alterations in molecular composition of humic substances from eucalypt plantation soils assessed by ¹³C-NMR spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 1, p. 293–306, 2013.

Teixeira Pc, Novais Rf, Barros Nf. Root growth and distribution of eucalyptus urophylla coppice. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 32, n. 1, p. 16–27, 2002.

Vargas LK, Scholles D. Biomassa microbiana e produção de C-CO₂ e N mineral de um Podzólico Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 24, n. 2, p. 35–42, 2000.

Vasconcelos A A. **Emissões de CO₂, particionamento da respiração e qualidade da matéria orgânica em solos sob cultivo de eucalipto no Cerrado** [tese]. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2014. 64p.

Vitorello VA, Cerri CC, Andreux E, Feller C, Victória RL. Organic Matter and Natural Carbon-13 Distribution in Forested and Cultivated Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 85, p. 773, 1989.

Walmsley JD, Jones DL, Reynolds B, Price MH, Healey JR. Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 3, p. 1104–1111, 2009.

Capítulo 2

EFEITO DE FONTES DE N NA EMISSÃO DE N₂O E CO₂ DO SOLO SOB POVOAMENTOS DE EUCALIPTO NO BRASIL

Resumo

O óxido nitroso (N₂O) é um dos principais gases precursores do aquecimento global, especialmente em sistemas agropecuários pelo aumento das fertilizações nitrogenadas. Entretanto, estudos sobre a sua emissão em florestas plantadas de eucalipto ainda são escassos na literatura. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de diferentes fontes de nitrogênio mineral sobre as emissões de N₂O e CO₂ em solos cultivados com eucalipto em diferentes regiões brasileiras. As avaliações de N₂O e CO₂ foram realizadas em povoamentos de eucalipto nas regiões de Monte Carmelo – MG, São Gabriel – RS e em Três Lagoas – MS. Para avaliação dos gases foram instaladas câmaras estáticas ao solo para posterior coleta dos gases. Com o intuito de avaliar o efeito da fonte nitrogenada na emissão de N₂O do solo sob eucalipto diferentes fontes de N foram aplicadas ao solo. Os fluxos de N₂O do solo sob povoamentos de eucalipto são baixos, mesmo sob condições favoráveis de umidade e aplicação de fertilizantes nitrogenados. Os solos sob povoamentos de eucalipto nas três regiões proporcionam emissões médias de 1,92 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N₂O e de 553,53 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂. Os fluxos de CO₂ do solo se dão nos primeiros dias após a fertilização nitrogenada do solo.

Abstract

Nitrous oxide (N₂O) is a major precursor gas of global warming, especially in agricultural systems due to increased nitrogen fertilization. However, studies on this subject in short-rotation eucalypt forests are still scarce in the literature. Thus, the aim of this study was to evaluate the effect of application of different sources of mineral nitrogen on emissions of N₂O and CO₂ in soils cultivated with eucalyptus in three major eucalypt growing region in Brazil. Evaluations of N₂O and CO₂ were carried out in eucalypt plantation in the region of Monte Carmelo - MG, São Gabriel - RS and Três Lagoas - MS. To evaluate the gas fluxes static PVC chambers were installed into the soil surface for later collection of gases. In order to evaluate the effect of nitrogen source in the emissions of N₂O by soils under eucalyptus stands different sources of N were applied to the soil (control with no added N; formulated NK fertilizer, urea, ammonium nitrate and ammonium sulfate). The N₂O fluxes observed for soils under eucalyptus plantations are low, even under favorable conditions of moisture and application of nitrogenous fertilizers. The N₂O and CO₂ emissions, respectively, by soils under eucalyptus plantations in the three regions averaged 1.92 kg ha⁻¹ yr⁻¹ and 553.53 kg ha⁻¹ yr⁻¹. Soil CO₂ fluxes are greater in the first days after nitrogen fertilization of the soil.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas grande atenção tem sido despendida a respeito do aumento das concentrações dos gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera e sua mitigação. Dentre os principais GEEs destacam-se o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e o óxido nitroso, os quais encontram-se em concentrações médias na atmosfera de, aproximadamente, 379, 1,77 e 0,32 ppm, respectivamente (IPCC, 2013). Dentre esses gases o N_2O é o que possui maior potencial de aquecimento da atmosfera que é, aproximadamente, 298 vezes maior que o do CO_2 (Cerri et al., 2007).

A nível global estima-se que 20% dos GEEs emitidos para a atmosfera sejam originários da atividade agrícola (IPCC, 2013). Porém, no Brasil esses valores são mais alarmantes, pois a agricultura contribui com aproximadamente 75% das emissões de CO_2 e até 94% das de N_2O (Cerri e Cerri, 2007; Cerri et al., 2009). Além de processos naturais que ocorrem no solo, o uso de fertilizantes nitrogenados é a principal fonte de emissão de N_2O do solo para a atmosfera (Forster et al., 2007).

Nos solos, a emissão de N_2O sofre influência da temperatura, umidade, teor de CO_2 , pH do solo e teor de N (Cuhel e Simek, 2011; Jantalia et al., 2008). Este último, quando na forma de NH_4^+ , favorece o processo de nitrificação no solo que pode ter como um dos produtos finais o N_2O (Almeida et al., 2015; Signor e Cerri, 2013). Já durante o processo de desnitrificação o N_2O é produzido quando bactérias anaeróbicas facultativas utilizam o nitrato (NO_3^-) como aceptor final de elétrons em substituição ao oxigênio (Carmo et al., 2005). Esse processo é favorecido pela disponibilidade de CO_2 , umidade do solo e teor de NO_3^- , especialmente advindo da fertilização nitrogenada (Almeida et al., 2015; Cameron et al., 2013; Signor e Cerri, 2013).

Ao avaliar os fluxos de N_2O do solo no estado de São Paulo, Coutinho et al. (2010) verificaram maiores emissões deste gás na áreas sob mata secundária ($0,88 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), seguida por povoamento de eucalipto ($0,66 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e pastagem ($0,35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Resultado similar foi observado por Zhang et al. (2014) na China. Os autores observaram maiores fluxos de N_2O do solo sob *Acacia auriculiformis* ($2,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), quando comparado ao solo sob *Eucalyptus urophylla* ($1,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), e atribuíram as maiores emissões de N_2O à qualidade do material aportado ao solo.

Já Capa et al. (2015), ao avaliarem os fluxos de N_2O sob café no Equador fertilizado com dose baixa, média e alta de N, verificaram emissões de N_2O na ordem de 2,9; 10,9 e $12,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Os autores atribuíram às maiores emissões de N_2O evoluídas do solo à fertilização nitrogenada aplicada ao solo e

constatarem que essas emissões de N₂O do solo se dão até 15 dias após a aplicação da fertilização nitrogenada. Esses resultados corroboram com os encontrados por Carmo et al. (2013) ao avaliar o cultivo de cana fertilizada com N em São Paulo, onde foram verificadas emissões de N₂O de 7,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹.

No entanto, em revisão recente a respeito das emissões de N₂O em solos sob diferentes usos e biomas do Brasil, Meurer et al. (2016), verificaram, no geral, baixas emissões médias de N₂O (0,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹). Além disso, foi observada baixa influência das fertilizações nitrogenadas nos fluxos de N₂O e que as características como pH, COS e teor de argila não se correlacionaram com as emissões de N₂O evoluídos do solo.

Estudos de emissões de N₂O em florestas plantadas de eucalipto no Brasil ainda são escassos na literatura. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da aplicação de diferentes fontes de nitrogênio mineral sobre as emissões de N₂O e CO₂ em solos cultivados com eucalipto em diferentes biomas brasileiros.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram instalados experimentos de campo em três localidades do Brasil onde há grandes áreas cultivadas com eucalipto (Monte Carmelo, MG, São Gabriel, RS e Três Lagoas, MS). Essas áreas têm solos e climas distintos (Quadro 1).

Quadro 1. Épocas de avaliação e características e das regiões.

Região	Mês	Temperatura ₁	Precipitação ₁	Areia	Silte	Argila
		°C	mm	----- % -----		
Monte Carmelo - MG	Maio 2015	18,8	90	18	7	75
São Gabriel - RS	Julho 2015	12,8	180	17	55	28
Três Lagoas - MS	Novembro 2015	26,6	196	80	3	17

¹Médias do mês avaliado.

Foram escolhidos povoamentos de eucalipto em segunda rotação manejados por alto fuste (reforma), com aproximadamente 18 meses, para o estudo. Essa idade foi escolhida porque é nessa fase que os povoamentos de eucalipto recebem adubação de cobertura (NK).

O delineamento experimental utilizado foi o de medidas repetidas ao longo do tempo, com cinco tratamentos, que constituíram de: quatro fontes de N (nitrato de amônio, sulfato de amônio, uréia, fertilizante comercial (NK 10-00-30, onde a fonte de

N é o sulfato de amônio) e o controle (sem adição de fertilizante nitrogenado), e com cinco repetições. Na região de São Gabriel não foi utilizada a fonte sulfato de amônio.

Uma dose fixa de 100 kg ha⁻¹ de N foi utilizada independente da fonte. Os fertilizantes em grânulos foram aplicados em filete na superfície do solo e dentro das câmaras de PVC (utilizada para amostragem dos gases). Em seguida foi aplicado água com regador de forma a simular uma chuva de 30 mm logo após a aplicação do fertilizante.

Para a determinação dos GEEs foram instaladas câmaras estáticas (anéis de PVC com 10 cm de altura e 75 mm de diâmetro) no solo até 5 cm de profundidade. Essas câmaras foram posicionadas a 50 cm da planta de eucalipto nas entrelinhas de plantas, posição na qual são, geralmente, aplicados os fertilizantes em cobertura. Os gases foram amostrados aos 1, 2, 3, 6 e 10 dias após aplicação de N em Monte Carmelo e São Gabriel, e nos dias 1, 2, 3, 4, 5, 7, 11 após a aplicação de N em Três Lagoas, nas referidas épocas (Quadro 1).

No momento da amostragem dos gases as câmaras, com volume final de 0,7068 L, foram fechadas hermeticamente com tampas de PVC, dotadas de septo de borracha na parte superior, de modo que as mudanças de concentração dos GEEs pudessem ser medidas ao longo do tempo (intervalos de coleta pré determinados). Após cada dia de coleta as câmaras eram destampadas para que o equilíbrio com o ambiente fosse restabelecido. Os gases foram coletados nos intervalos de 0, 15, 30 e 60 minutos, após o fechamento das câmaras, utilizando-se seringas de 60 mL, onde, aproximadamente, 15 mL de gás eram coletados e injetados sob pressão em tubos de vidro de 10 mL pré-evacuados. Os tubos foram levados ao laboratório para determinação das concentrações de N₂O e CO₂ em cromatógrafo gasoso equipado com espectrômetro de massas (GCMS-QP2010 SE – Shimadzu Corporation). A determinação das concentrações do N₂O foram obtidas segundo Ekeberg et al. (2004).

A seguinte equação foi utilizada para o cálculo do fluxo dos GEEs (Smith e Conen, 2004):

$$\text{Fluxo dos gases (mg m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{)} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} * M * \frac{(P * V)}{(R * T)} * \frac{1}{A} * 3,6$$

Em que:

$\Delta Q/\Delta t$: coeficiente angular (ppm/s), obtido do ajuste das concentrações ao longo do tempo;

M: massa molar do gás (g/mol);

P: pressão (1 atm);

V: volume de gás coletado (L);

R: constante dos gases (0,08205746);

T: temperatura (K);

A: área da câmara (m²).

A temperatura (°C) e a umidade (%) superficial do solo (0-5 cm) foram medidas por meio do sensor EC-5 (Decagon Devices Inc., Pullman, WA) no momento da coleta dos gases ao lado da câmara, assim como a temperatura do ar.

Na região de Três Lagoas, a fim de se avaliar o efeito residual dos fertilizantes nitrogenados, após o término da coleta dos GEEs (final do experimento), as câmaras foram totalmente inseridas ao solo (0-10 cm). O solo do interior das câmaras foi separado em duas profundidades (0-5 e 5-10 cm) e realizaram-se as análises de N-total e C-total em espectrômetro de massa de razão isotópica, além dos teores de N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ (Mendonça e Matos, 2005).

A fim de comparar o efeito das fontes de N, em cada região, os resultados dos fluxos de N₂O e CO₂ do solo foram submetidos à análise de variância e as médias avaliadas pelo teste de Tukey a 10 % de probabilidade. O teste de Dunnett foi utilizado para comparar os fluxos de N₂O do solo das fontes de N um a um com o controle.

Os resultados de C e N total e de N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ do solo obtidos na região de Três Lagoas foram, também submetidos à análise de variância e as médias avaliadas pelo teste de Tukey a 10 % de probabilidade.

As correlações entre o fluxo de CO₂ e os fatores abióticos temperatura ambiente, temperatura e umidade do solo, na região de Três Lagoas, foram testadas pelo teste F.

RESULTADOS

As concentrações de N₂O ao longo dos dias, para cada tempo de coleta, não variaram ($p > 0,1$), ou seja, o fluxo de N₂O ao longo dos dias foi nulo. Diante disso, foi realizada a média dos dias para cada tempo de coleta e ajustado o fluxo de N₂O para cada fonte de N.

Emissões de N₂O do solo

As avaliações das emissões de N₂O nas três regiões indicaram que os fluxos de N₂O evoluídos do solo sob povoamentos de eucalipto (Figura 1) são bastante baixos (Figura 1) quando comparadas as culturas da cana e café. E são insignificantes quando comparados aos fluxos de CO₂ evoluídos do solo (Figura 2), mesmo o N₂O possuindo potencial poluidor maior. Verifica-se fluxos médios de N₂O, independentes das fontes de N, na ordem de 0,0036; 0,012 e 0,041 mg m⁻² h⁻¹ para as regiões de Monte Carmelo, São Gabriel e Três Lagoas, respectivamente (Figura 1).

A fertilização com distintas fontes de N proporciona aumento nos fluxos de N₂O na região de Três Lagoas quando comparadas ao solo do tratamento controle (sem adição de N) (Figura 1). Para a região de São Gabriel somente o solo fertilizado com nitrato de amônio diferiu do tratamento controle quanto ao fluxo de N₂O (Figura 1). No entanto, não foram verificadas diferenças ($p > 0,1$) nos fluxos de N₂O do solo (comparadas com o controle), nem mesmo entre as fontes de N na região de Monte Carmelo (Figura 1).

Ao considerar somente os solos que foram fertilizados com N, os maiores fluxos de N₂O foram verificados para região de Três Lagoas, onde variaram de 0,025 a 0,051 mg m⁻² h⁻¹ nos solos fertilizados com ureia e sulfato de amônio, respectivamente (Figura 1). Já em São Gabriel o maior fluxo de N₂O foi de 0,025 mg m⁻² h⁻¹ para o solo fertilizado com nitrato de amônio (Figura 1).

Ao final das avaliações dos gases na região de Três Lagoas as análises de solo revelaram que apesar do N-total não diferir ($p > 0,1$) entre os tratamentos (Quadro 2), de maneira geral, os teores de N-NH₄⁺ no solo fertilizado com diferentes fontes de N são mais elevados que o controle e a mesma tendência é observada para o N-NO₃⁻ em valores absolutos.

Emissões de CO₂ do solo

Os maiores fluxos de CO₂ do solo foram verificados no primeiro dia de avaliação dos gases nas três regiões, com declínio acentuado a partir do segundo dia de avaliação (Figura 2).

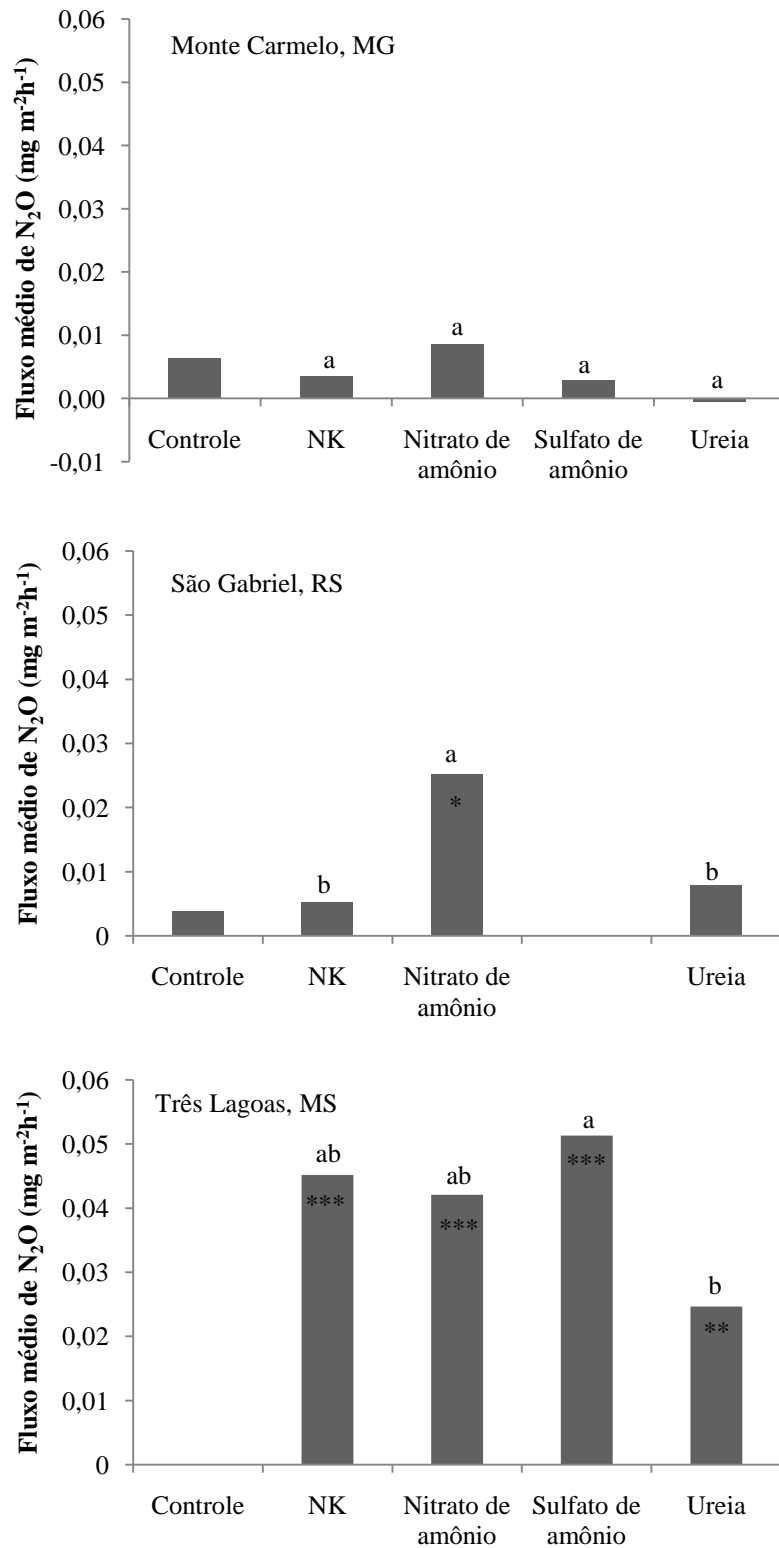


Figura 1. Fluxos médios de N₂O de solos fertilizados com diferentes fontes de nitrogênio. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si quanto à fonte de fertilizante nitrogenado pelo teste de Tukey a 10 % de probabilidade. *Significativo pelo teste de Dunnnett: * (p < 0,1), ** (p < 0,05) e *** (p < 0,001), ao comparar cada fonte de N ao controle.

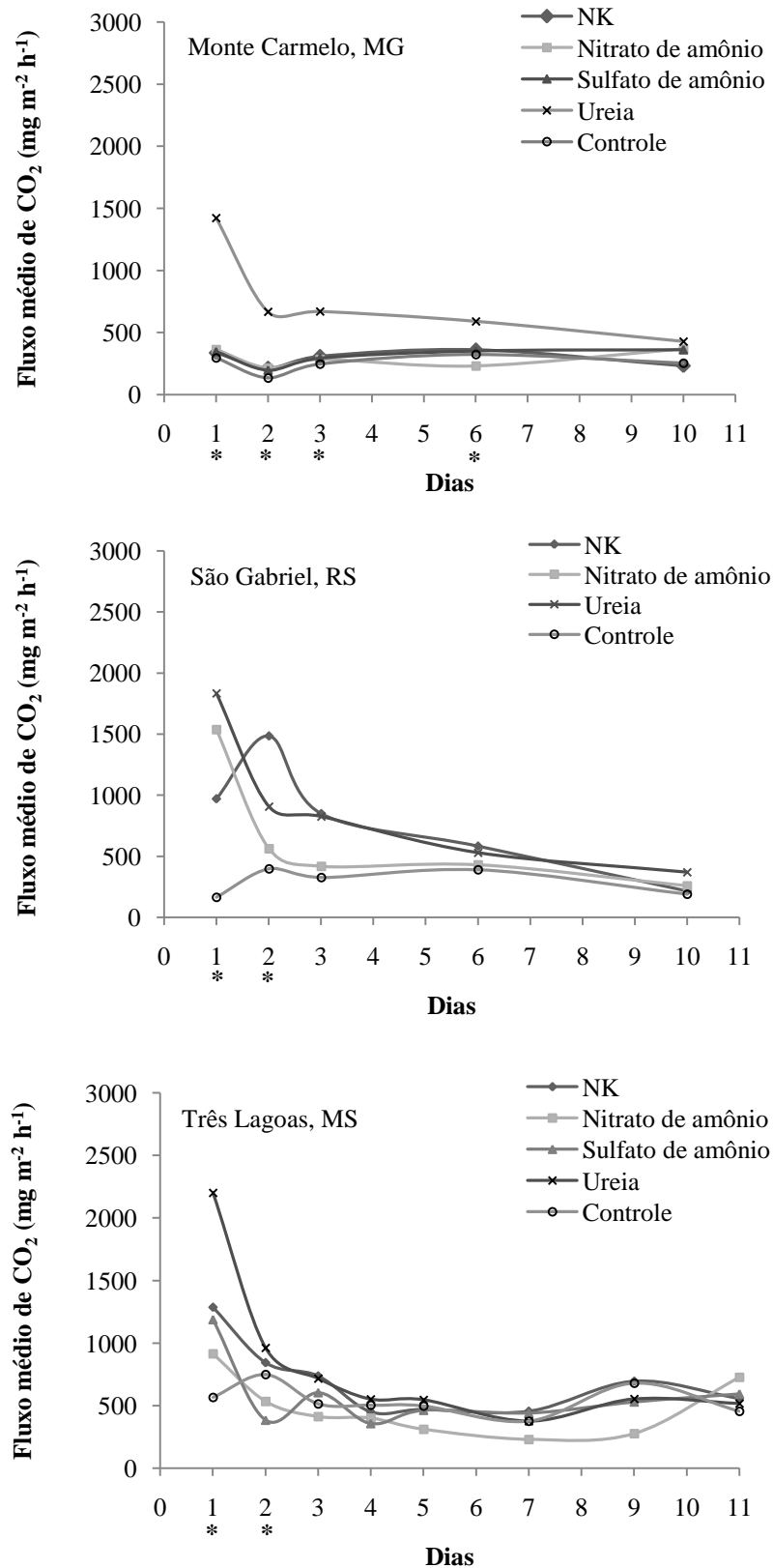


Figura 2. Fluxos médios de CO₂ de solos fertilizados com diferentes fontes de nitrogênio. *Significativo pelo teste de Tukey (p < 0,1).

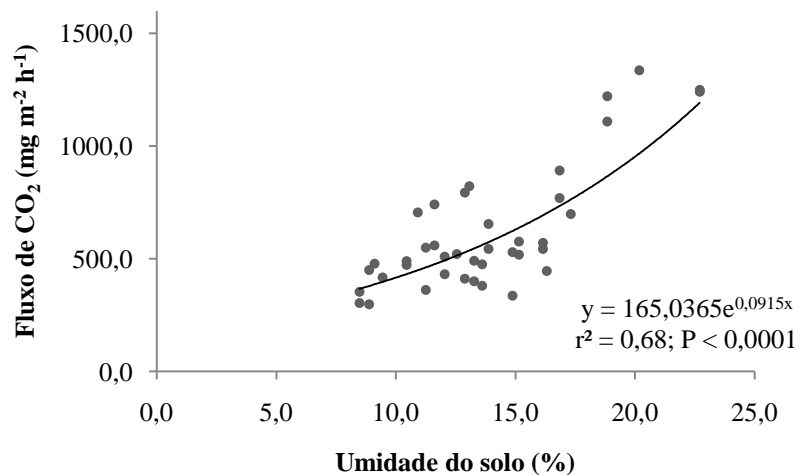
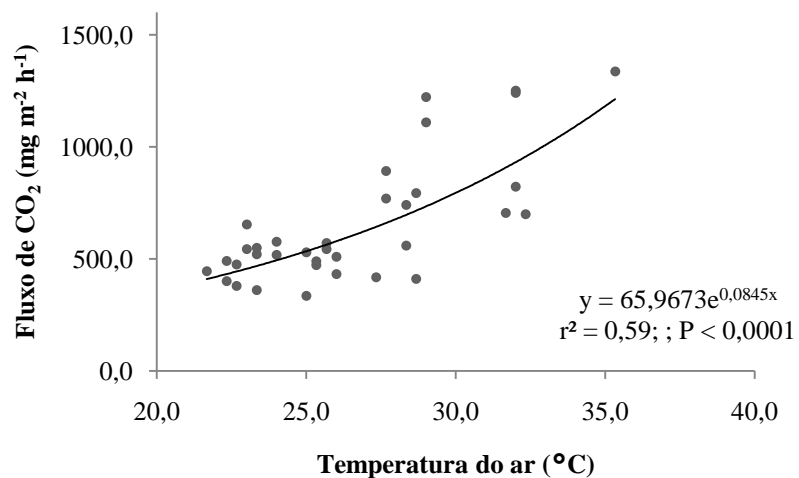
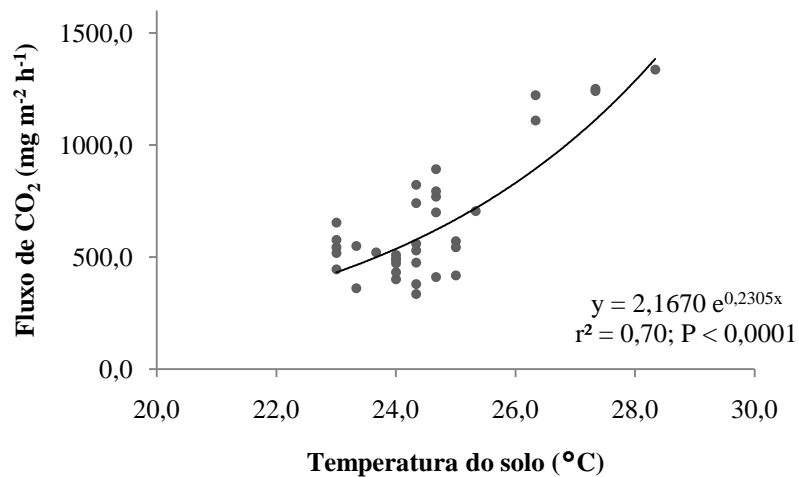


Figura 3. Relação entre CO₂ evoluído do solo e temperatura do solo, temperatura do ar e umidade do solo para a região de Três Lagoas - MS. Coeficiente de determinação testado pelo teste F.

O solo fertilizado com ureia proporcionou os maiores valores de CO₂ evoluídos do solo, com 1424, 1836 e 2201 mg m⁻² h⁻¹ no primeiro dia de avaliação, respectivamente, para regiões de Monte Carmelo, São Gabriel e Três Lagoas (Figura 2).

Os fluxos de CO₂ do solo na região de Três Lagoas apresentaram correlação positiva com os fatores abióticos temperatura do ar e temperatura e umidade do solo (Figura 3).

Quadro 2. Teores de nitrato (N-NO₃⁻), amônio (N-NH₄⁺), N - total, C – total, razão isotópica e relação C:N do solo ao final das coletas de GEEs para região de Três Lagoas.

Tratamento	Prof.	N-NO ³⁻	N-NH ⁴⁺	N-total	C-total	C:N solo
	cm	----- mg kg ⁻¹ -----			%	
Controle		1,3 bc	52,4 b	863 ab	1,5 a	16,9
NK		0,3 c	140,1 a	931 ab	1,5 a	16,5
Nitrato de amônio	0-5	6,9 ab	108,6 ab	685 b	1,0 a	14,1
Sulfatode amônio		9,3 a	158,7 a	1465 a	2,1 a	14,4
Ureia		5,3 abc	178,1 a	812 ab	1,0 a	12,5
Controle		0,1 a	54,8 c	696 a	1,2 a	17,0
NK		0,9 a	129,8 bc	937 a	1,5 a	15,8
Nitrato de amônio	5-10	4,8 a	146,9 ab	692 a	0,8 a	11,9
Sulfatode amônio		3,1 a	183,9 ab	471 a	0,6 a	12,5
Ureia		0,4 a	212,5 a	576 a	0,8 a	13,3

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si, quanto à fonte nitrogenada, pelo teste de Tukey (p < 0,1).

DISCUSSÃO

Baixas concentrações de N₂O foram observadas ao longo dos dias de avaliação mesmo utilizando doses de N relativamente elevadas (100 kg ha⁻¹ de N), diferentes e com condições favoráveis de umidade do solo. Isso indica que ocorrem baixas emissões de N₂O em solos sob povoamentos de eucalipto. O mesmo comportamento foi observado em florestas de eucalipto na China, onde a adição de até 100 kg ha⁻¹ de nitrato de amônio ao solo não aumentou as emissões de N₂O (Zhang et al., 2014). Os autores atribuíram as baixas emissões de N₂O, 0,02 mg m⁻² h⁻¹, aos baixos teores iniciais de N no solo e a alta demanda de N pelas plantas e microrganismos, o que provavelmente também ocorre no atual estudo.

A emissão de N₂O do solo é reduzida em situações de baixa disponibilidade de N no solo (Paustian et al., 2016), aumento na eficiência de absorção deste nutriente pelas plantas (Yang e Cai, 2007) e condições de baixa precipitação (Perdomo et al.,

2009). No entanto, no presente estudo nem água e nem o N no solo foram limitantes à emissão de N₂O (Quadro 2). A fertilização com diferentes fontes de N aumentou os teores de N mineral no solo e mesmo assim os fluxos de N₂O do solo em povoamentos de eucaliptos ainda foram baixos.

No atual estudo, fontes de N, em dose relativamente elevada, o dobro utilizado pela maioria dos plantios comerciais de eucalipto no Brasil, e a simulação de chuva foram executadas visando estimular as emissões de N₂O. Isso justifica as maiores emissões médias de N₂O (1,92 kg ha⁻¹ ano⁻¹) para as três regiões avaliadas quando comparadas ao valor médio (0,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹) encontrado por Meurer et al. (2016) em meta-análise de dados da literatura. No entanto, esses autores não avaliaram florestas plantadas de eucalipto e grande parte dos trabalhos foram em solos em estágios de degradação avançada, o que justifica as baixas emissões de N₂O.

A qualidade do resíduo vegetal aportado na superfície também é responsável por maiores ou menores níveis de emissão de N₂O pelo do solo (Gomes et al., 2009; Zhang et al., 2014). Segundo os autores a presença de resíduos na superfície do solo com alta relação C:N favorece a imobilização do N (Huang et al., 2004), o que ocasiona reduções das reações de nitrificação e desnitrificação no solo. Como consequência, o N permanece mais tempo no solo, com maiores chances de ser assimilado pela planta e/ou emitido como NH₃ e/ou N₂. Silva (2008) estudando a decomposição dos componentes da planta, folha, galho e casca de eucalipto, aportados ao solo com diferentes teores iniciais de N, verificou imobilização temporária do N em materiais mais recalcitrantes (galho e casca) com alta relação C:N e lignina:N. Já Milagres (2014), ao avaliar a emissão de N₂O do solo sob cana de açúcar em São Paulo, verificou que a aplicação de vinhaça aliado a fertilização nitrogenada potencializou as emissões de N₂O do solo devido a fonte de C mais lábil prontamente disponível à ação dos microrganismos. O mesmo comportamento foi verificado por Carmo et al. (2013), que as emissões de N₂O e as de CO₂ do solo aumentaram quando combinaram fertilizantes orgânicos e minerais em cana de açúcar no estado de São Paulo.

No presente estudo, na região de Três Lagoas/MS, após colheita com Feller+Skidder foi quantificado média de 14 t ha⁻¹ de serapilheira restante na área. Aliado a isso, Pegoraro (2007), ao avaliar o estoque de C na biomassa de parte aérea e raiz da planta durante o ciclo do eucalipto, verificou que até dois anos após o plantio é estocado cerca de 20 t ha⁻¹ de C via biomassa de raiz e 20 t ha⁻¹ de C na parte aérea do

eucalipto. Isso, aliado as emissões de CO₂ verificadas no presente estudo, indicam que o C lábil não foi limitante as emissões de N₂O.

Efeitos da palha da cana de açúcar deixada sobre o solo nos fluxos de N₂O do solo não foram observados por Signor et al. (2014) em estudo conduzido em São Paulo. Porém, os autores verificaram aumentos significativos nos fluxos de CO₂ evoluídos do solo, quando maiores doses de palha da cana foram aplicadas ao solo, devido ao aumento da atividade microbiana induzida pela adição dos restos culturais. No entanto, em trabalho também conduzido em São Paulo com cana de açúcar com diferentes doses de N, foram verificados fluxos de N₂O de, aproximadamente, 2,5 mg m⁻² h⁻¹ quando aplicados 120 kg ha⁻¹ de nitrato de amônio e ureia (Signor et al., 2013), valores esses 50 vezes maiores que os observados no atual estudo.

De acordo com as análises de solo ao final do experimento, prevalece no solo às formas amoniacais de N, apesar das formas nítricas terem aumentado em relação ao controle (Quadro 2), provavelmente favorecido por grande parte dos fertilizantes utilizados fornecerem N na forma amoniacal. Isso indica potencial maior de ocorrer mais nitrificação como o principal processo do ciclo do N no solo.

Quando a nitrificação é a principal responsável pela formação de N₂O, fertilizantes amoniacais e o teor de NH₄⁺ no solo apresentam maiores relações com a quantidade de N₂O emitida (Liu et al., 2005; Signor e Cerri, 2013) em detrimento ao processo de desnitrificação. No entanto, apesar dos teores de NH₄⁺ no solo serem relativamente altas (comparadas ao controle sem adição de N), há duas questões que devem ser consideradas no que tange a possível emissão dessa fonte de N como N₂O para atmosfera: 1) o N-NH₄⁺ pode estar retido às cargas negativas do solo, tornando-o temporariamente inacessível a ação dos microrganismos; 2) a principal forma de assimilação do N pelas raízes do eucalipto é o NH₄⁺ (Locatelli et al., 1984), o que pode promover uma competição pelo N quando na solução do solo. Aliado a isso, podem ser favorecidas as perdas de N como NH₃ (Cantarella et al., 2008). No presente estudo esses dois processos, aliado a imobilização do N via serapilheira depositado sobre o solo, podem justificar as baixas emissões de N₂O nos povoamentos de eucalipto.

Apesar das baixas emissões verificadas para o N₂O, verificam-se emissões significativas de CO₂ do solo logo após a fertilização nitrogenada, em especial com ureia. A aplicação dos fertilizantes nitrogenados ao solo promovem a redução da relação C:N e, conseqüentemente, proporcionam aumento da atividade biológica (Fontaine et al., 2003; Pegoraro et al., 2011). Isso proporcionou maiores fluxos de CO₂ do solo no

primeiro dia de avaliação nas três regiões avaliadas. Esse fenômeno ainda não é claro, mas provavelmente depende da quantidade e da qualidade do COS facilmente degradável (Ding et al., 2010).

Huang et al. (2004) verificaram que a relação C:N dos resíduos é um bom indicador das emissões de CO₂ e N₂O do solo. Isso porque a maioria dos microrganismos do solo obtém energia a partir do COS. A fertilização nitrogenada aumenta a decomposição do COS facilmente degradável, mas suprime a decomposição do COS mais recalcitrante (Silva, 2008; Van Veen et al., 1989). Isso pode justificar as maiores emissões de CO₂ nos primeiros dias de avaliação dos gases, onde C-lábil e N não eram limitantes à ação dos microrganismos. Tal fato é suportado pelos menores fluxos de CO₂ verificados na região de Monte Carmelo, onde os teores de argila são mais altos e promovem maior proteção ao COS por meio da formação de complexos argilo-orgânicos (Kogel-Knabner et al., 2008; Mikutta et al., 2006; Zinn et al., 2005), mesmo quando N foi aplicado.

Dados semelhantes de emissão de CO₂ foram encontrados por Carmo et al. (2013), em estudos conduzidos com cana de açúcar no estado de São Paulo. Os autores verificaram aumento nas emissões de CO₂ evoluídos do solo (1666 mg m⁻² h⁻¹) logo após a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N via ureia ao solo sob cana de açúcar.

Maiores emissões de CO₂ do solo proporcionadas pela fertilização com ureia podem ser explicadas pela composição deste fertilizante (NH₂)₂CO (IPCC, 2013). Quando a ureia é aplicada ao solo enzimas (urease) promovem a quebra da molécula e o CO₂ é liberado (Cantarella, 2007). Desta maneira, parte do CO₂ do solo nos tratamentos onde se aplicou ureia provavelmente são provenientes do próprio adubo adicionado ao solo. Estas perdas, segundo dados do IPCC (2007), podem ser estimadas em até 73% do CO₂ total da ureia aplicada por ano. Maiores emissões de CO₂ do solo após fertilização com ureia também foram verificados em áreas cultivadas com feijão e milho na região central do Brasil (Cruvinel et al., 2011).

Apesar da fertilização nitrogenada, sobretudo com ureia, ser responsável pelos maiores fluxos de CO₂ nos primeiros dias de avaliação dos gases, os fluxos de CO₂ do solo mostram ser afetados pela temperatura, umidade do solo e temperatura do ar. Isso provavelmente pelo fato dos processos de respiração e decomposição estarem relacionados às atividades de microrganismos e raízes que são dependentes da temperatura e quantidade de água disponível no solo (Davidson e Janssens, 2006; Ding et al., 2010), assim como de nutrientes.

CONCLUSÕES

Solos sob povoamentos de eucalipto apresentam baixos fluxos de N₂O para a atmosfera mesmo sob condições ótimas de umidade e aplicação de diferentes fertilizantes nitrogenados.

Os solos de três regiões brasileiras produtoras de eucalipto proporcionam emissões médias de 1,92 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N₂O e de 553,53 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂ nas condições do presente estudo.

A fertilização nitrogenados solos sob eucalipto, sobretudo a ureia, representa uma importante fonte de emissão de CO₂ somente nos primeiros dias após a sua aplicação.

O fluxo de CO₂ evoluído do solo variou positivamente com a temperatura ambiente e a temperatura e umidade do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida RF, Naves ER, Silveira CH, Wendling B. Emissão de óxido nitroso em solos com diferentes usos e manejos: uma revisão. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 8, p. 441–461, 2015.

Cameron KC, DI HJ, MOIR JL. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. **Annals of Applied Biology**, v. 162, n. 2, p. 145–173, 2013.

Cantarella H, Trivelin PCO, Contin TLM, Dias FLF, Rossetto R, Marcelino R, Coimbra RB, Quaggio JA. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 4, p. 397–401, 2008.

Cantarella H. **Nitrogênio**. p. 375-470. In: Novais, R.F.; Alvarez V. V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B; Neves, J.C.L. (Ed.). Fertilidade do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. 1017p.

Capa D, Pérez-Esteban J, Masaguer A. Unsustainability of recommended fertilization rates for coffee monoculture due to high N₂O emissions. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 4, p. 1551–1559, 2015.

Carmo JB, Andrade CA, Cerri CC, Piccolo MC. Disponibilidade de nitrogênio e fluxos de N₂O a partir de solo sob pastagem após aplicação de herbicida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 735–746, 2005.

Carmo JB, Filoso S, Zotelli LC, Neto ERS, Pitombo LM, Duarte-Neto PJ, Vargas VP, Andrade CA, Gava GJC, Rossetto R, Cantarella H, Neto AE, Martinelli LA. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in brazil: Effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 3, p. 267–280, 2013.

Cerri CC, Maia SMF, Galdos MV, Cerri CEP, Feigl BJ, Bernoux M. Brazilian Greenhouse Gas Emissions: the Importance of Agriculture and Livestock. **Sci. Agri.** (Piracicaba, Braz.), v. 66, n. November/December, p. 831–843, 2009.

Cerri CC, Cerri CE. Agricultura e aquecimento global. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 19, p. 40–44, 2007.

Cerri CEP, Sparovek G, Bernoux M, Easterling WE, Melillo JM, Cerri CC. Tropical Agriculture and Global Warming: Impacts and Mitigation Options. **Sci. Agri.** (Piracicaba, Braz.), v. 64, n. January/February, p. 83–99, 2007.

Coutinho RP, Urquiaga S, Boddey RM, Alves BJR, Torres AQA, Jantalia CP. Carbon and nitrogen stocks and N₂O emission under different land use in Atlantic Forest biome. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 45, n. 2, p. 195–203, 2010.

Cruvinel EBF, Bustamante MMC, Kozovits AR, Zepp RG. Soil emissions of NO, N₂O and CO₂ from croplands in the savanna region of central Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 144, n. 1, p. 29–40, 2011.

Cuhel J, Simek M. Proximal and distal control by pH of denitrification rate in a pasture soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 141, n. 1-2, p. 230–233, 2011.

Davidson EA, Janssens IA. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, n. March, p. 165–173, 2006.

Ding, W. Yu H, Cai Z, Han F, Xu Z. Responses of soil respiration to N fertilization in a loamy soil under maize cultivation. **Geoderma**, v. 155, n. 3-4, p. 381–389, 2010.

Ekeberg D, Ognier G, Fongen M, Jonerc EJ, Wickstrom T. Determination of CH₄, CO₂ and N₂O in air samples and soil atmosphere by gas chromatography mass spectrometry, GC-MS. **Journal of environmental monitoring**, v. 6, n. 7, p. 621–3, 2004.

Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 6, p. 837–843, 2003.

Forster P et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Solomon S, Quin D, Manning M, Johnson JMF, Reicosky DC, Allmaras RR, Sauer TJ, Venterea RT, Dell CJ. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agriculture in the central USA. **Soil e Tillage Research**, v. 83, p. 73-94, 2005.

Gomes J, Bayer C, Costa FS, Piccolo MC, Zanatta JA, Vieira FCB, Six J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 1, p. 36–44, 2009.

Huang Y, Zoub J, Zheng X, Wang Y, Xua X. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 6, p. 973–981, 2004.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: the physical science basis. [Acesso em: 01 de março de 2016]. Disponível em:

<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

Jantalia CP, Santos HP, Urquiaga S, Boddey RM, Alves BJR. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, n. 2, p. 161–173, 2008.

Kögel-Knabner I, Guggenberger G, Kleber M, Kandeler E, Kalbitz K, Scheu S, Eusterhues K, Leinweber P. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 61–82, 2008.

Liu XJ, Mosier AR, Halvorson AD, Zhang FS. Tillage and nitrogen application effects on nitrous and nitric oxide emissions from irrigated corn fields. **Plant and Soil**, v. 276, n. 1-2, p. 235–249, 2005.

Locatelli M, Barros NF, NEVES JCL, Novais RF. Efeito de formas de nitrogênio sobre o crescimento e composição mineral de mudas de eucalipto. **R. Árvore**, 8:53-69, 1984.

Mendonça ES, Matos EDS. *Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises*. **Viçosa, MG**, p. 77, 2005.

Meurer KHE, Franko U, Stange CF, Rosa JD, Madari BE, Jungkunst HF. Direct nitrous oxide (N₂O) fluxes from soils under different land use in Brazil - a critical review. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 2, p. 023001, 2016.

Mikutta R, KLEBER M, TORN MS, JAHN R. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance? **Biogeochemistry**, v. 77, n. 1, p. 25–56, 2006.

Milagres JJ. **Emissões de N₂ e N₂O provenientes do fertilizante aplicado a solos cultivados com cana-de-açúcar pelo método do traçador ¹⁵N** [tese]. Universidade Federal de São Paulo, 2014. 103p.

Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson GP, Smith P. Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49–57, 2016.

Pegoraro RF. **Sequestro de carbono e alterações bioquímicas da matéria orgânica de solos cultivados com eucalipto** [tese]. Universidade Federal de Viçosa, 2007. 140 p.

Pegoraro RF, Silva IR, Novais RF, Barros NF, Fonseca S. Fenóis derivados da lignina, carboidratos e aminoaçúcares em serapilheira e solos cultivados com eucalipto e pastagem. **Revista Árvore**, v. 35, n. 2, p. 359–370, 2011.

Perdomo C, Irisarri P, Ernst O. Nitrous oxide emissions from an Uruguayan argiudoll under different tillage and rotation treatments. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 84, n. 2, p. 119–128, 2009.

Signor D, Cerri CEP. Nitrous oxide emissions in agricultural soils : a review. **Pesquisa Agropecuaria Tropical Goiania**, v. 2013, p. 322–338, 2013.

Signor D, Cerri CEP, Conant R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, p. 015013, 2013.

Signor D, Pissioni LLM, Cerri CEP. Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palha de cana-de-açúcar sobre o solo. **Bragantia**, v. 73, n. 2, p. 113–122, 2014.

Silva EF. **Frações da matéria orgânica e decomposição de resíduos da colheita de eucalipto em solos de tabuleiros costeiros da Bahia** [tese]. Universidade Federal de Viçosa, 2008. 110 p.

Smith KA, Conen F. **Measurement of Trace Gases, I: Gas analysis, Chamber Methods, and Related Procedures**. In: Soil and Environmental Analysis: Modern Instrumental Techniques. 3 ed. New York, 2004. 576 p.

Van Veen JA, Merckx R, Van De Geijn SC. Plant- and soil related controls of the flow of carbon from roots through the soil microbial biomass. **Plant and Soil**, v. 115, n. 2, p. 179–188, 1989.

Yang L, Cai Z. Effects of nitrogen application and maize growth on N₂O emission from soil. **Frontiers of Agriculture in China**, Beijing, v. 1, n. 1, p. 37-42, 2007.

Zhang WW, Zhu X, Luo Y, Rafique R, Chen H, Huang J, Mo J.. Responses of nitrous oxide emissions to nitrogen and phosphorus additions in two tropical plantations with N-fixing vs. non-N-fixing tree species. **Biogeosciences**, v. 11, n. 18, p. 4941–4951, 2014.

Zinn YL, Lal R, Resck DVS. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 127, n. 1-2, p. 168–173, 2005.

Capítulo 3

CONTRIBUIÇÃO DE RAÍZES FINAS DO EUCALIPTO PARA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Resumo

Estudos que relatam o conteúdo de carbono (C) aportado ao solo via raízes finas do eucalipto e a taxa de recuperação desse C pelo solo são escassos na literatura, especialmente no Brasil. O objetivo do estudo foi estimar o aporte de C ao solo via raízes finas do eucalipto manejado sob condução e reforma, além da taxa de recuperação desse C pelo solo. O estudo foi realizado na região de Três Lagoas, MS, onde povoamentos de eucaliptos ao final da primeira rotação foram selecionados para instalação do experimento. Para avaliar a produção de raízes finas ao longo do tempo utilizou-se a técnica do “in growth core”. Os aparatos metálicos foram preenchidos com o solo de pastagem (C4) e instalados na camada de 5 a 15 cm de profundidade do solo sob povoamentos de eucalipto. O delineamento amostral foi em medidas repetidas no tempo (acumulados: 0-3, 0-6, 0-9, 0-12 meses e trimestrais 3-6, 6-9, 9-12 meses) com dois manejos (condução e reforma) em cinco repetições. A partir daí foram obtidos a produção, taxa de renovação e teor e aporte de C das raízes finas do eucalipto ao longo do tempo, além dos teores de C do solo e a taxa de recuperação do C aportado pelas raízes finas do eucalipto pelo solo. O eucalipto manejado sob reforma proporcionou maiores incrementos de raízes finas ao solo que o sob condução, porém o último apresentou maior taxa de renovação e aporte de C ao solo. As raízes finas do eucalipto contribuíram ao ano com 17 e 13 % do C total do solo ao final de um ano. A taxa de recuperação do C aportado pelas raízes finas do eucalipto pelo solo foi de 42,5 e 28 %, respectivamente, para o povoamento manejado sob condução ou reforma.

Abstract

There are few studies reporting the carbon (C) content contributed to the soil via thin eucalyptus roots and the recovery rate that the soil C, especially in Brazil. The objective of the study was to assess clonal eucalypt fine root growth and turnover, as well as their contribution to SOC by tracking down the changes in the ¹³C natural abundance. The study was conducted in the region of Três Lagoas County, MS, Brazil, where stands of eucalyptus trees at the end of the first rotation (7 yr-old) were selected for the experiment. Just after harvesting we buried in the soil (5 to 15 cm depth) screened (2 mm) stainless steel root ingrowth cores and then destructively sampled them over distinct time periods. To assess cumulative fine root production the cores were maintained in the field from 0 to 3, 0 to 6, 0 to 9, and 0 to 12 months and for trimestral root production other cores were removed had their fine roots separated and then reburied at the end of the 0 to 3, 3 to 6, 6 to 9, and 9 to 12 months periods. Root in growth cores were installed in eucalypt stands under two managements: coppicing or new planting. Eucalyptus managed under new planting has greater fine roots production, while that managed under coppicing showed a higher turnover rate and C input to soil. Fine eucalyptus roots contributed with 17 and 13% of the total soil C at the end of the first year. The recovery rate of C contributed by the fine roots of eucalyptus to the soil was 42.5 and 28%, respectively, for stands managed under coppicing and new planting.

INTRODUÇÃO

Embora existam práticas comprovadas para mitigação dos GEEs (Paustian et al., 2016), o emprego dessas com base em solo ainda são pouco aplicadas e devem se basear em diminuir as emissões dos GEEs e aumentar seu acúmulo no solo. O solo é um dos principais reservatórios ativos de C na biosfera, com aproximadamente 1.550 bilhões de toneladas como carbono orgânico do solo (COS) (Lal, 2008). Porém, quantificar os estoques e desvendar o potencial do solo em acumular C continua a ser um desafio.

Nesse contexto, as florestas plantadas se destacam como formas de acumular C da atmosfera na forma de biomassa acima e abaixo do solo (Gatto et al., 2010; Lima et al., 2006; Pulrolnik et al., 2009; Zinn et al., 2011), porém seu efeito no COS não é muito claro, especialmente no que tange à produção de raízes finas e a transferência do seu C para o solo.

Informações a respeito da produção e renovação de raízes finas são relatadas em estudos como o conduzido por Ostonen et al. (2005) com *Picea abies* (L.) Karst na Estônia. Esses autores verificaram que as raízes finas contribuem com aproximadamente 13 % da biomassa total da planta, o que representa uma produção de 2,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ e taxa de renovação de 1,4 ano⁻¹ de raízes finas. Em revisão da literatura a respeito da taxa de renovação de raízes finas de florestas Européias, Brunner et al. (2013) verificaram taxa de renovação média de 0,86 e de 0,88 ano⁻¹ para *Fagus sylvatica* e *Picea abies*, respectivamente. Para povoamento de eucalipto no Brasil, Jourdan et al. (2008) verificaram produção de raízes finas de 2,42 e 2,14 t ha⁻¹ ano⁻¹ com taxa de renovação de 3,43 e 2,97 ano⁻¹ sem e com fertilização nitrogenada, respectivamente. No entanto, poucos são os estudos que relatam o conteúdo de C aportado ao solo via raízes finas, especialmente em povoamentos de eucalipto no Brasil.

Em estudo conduzido com *Cupressus lusitanica* na Etiópia, Asaye e Zewdie (2013) verificaram que o aporte de C via raízes finas variou de 0,9 a 2,9 t ha⁻¹ ano⁻¹, na camada de 0-40 cm de profundidade. Esses autores atribuíram essa variação ao método de coleta das raízes finas e ao manejo florestal adotado. O aporte de C via raízes finas também foi verificado por McNally et al. (2015) em estudo com azevém na Nova Zelândia. Esses autores constataram aporte médio de 0,59 t C ha⁻¹ ano⁻¹ via raízes finas na camada de 0-20 cm do solo.

Recentes estudos têm proposto o cultivo de culturas com sistemas radiculares mais desenvolvidos e profundos para proporcionar maiores inputs de C ao solo (Kell, 2012; Lynch e Wojciechowski, 2015). Esse maior input de C via raízes se devem à

proximidade das raízes, especialmente raízes finas (< 2 mm) com o solo, onde os produtos de sua decomposição são, no geral, melhor incorporados aos agregados e mais facilmente adsorvidos às superfícies minerais do que os resíduos acumulados acima do solo (Rasse et al., 2005; Sanoullah et al., 2011).

Ganha destaque também os estudos que buscam elucidar a contribuição dos exsudados radiculares para o COS (Cheng et al., 2014; Rasse et al., 2005; Xiao et al., 2015) e o provável Efeito Priming de estímulo (positivo) ou de supressão (negativo) do COS (Cheng et al., 2014; Fontaine et al., 2003; Kuzyakov, 2010; Xiao et al., 2015). No entanto, são escassos na literatura estudos que revelam a taxa de recuperação do C pelo solo, principalmente aportado pelas raízes finas.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo estimar o aporte de C ao solo via raízes finas do eucalipto manejado sob condução e reforma e a taxa de recuperação desse C pelo solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado em plantações comerciais de eucalipto localizadas na região de Três Lagoas – MS. O local possui coordenadas geográficas 20°53' de latitude (S) e 51°44' longitude (W) e o clima é do tipo Aw (Köppen), que corresponde ao clima característico dos Cerrados brasileiros. Os verões são quentes e úmidos e os invernos são amenos e secos, podendo ocorrer geadas esporádicas nos meses mais frios do ano (Jun-Jul). A temperatura média anual é de 28 °C, e a pluviosidade varia de 900 a 1.400 mm ano⁻¹. A altitude média da região é de 350 m. A cobertura vegetal natural era de Cerrado, mas como uso atual predomina pastagens plantadas do gênero *Urochloa* (braquiárias), na sua maioria em estádios variados de degradação. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Quadro 1).

Quadro 1. Características químicas e físicas do solo sob povoamento de eucalipto antes da instalação do experimento.

Posição	pH ¹	P ²	K ²	Ca ⁺²²	Mg ⁺²²	Al ⁺³³	(H+Al) ⁴	MO ⁵	Areia	Silte	Argila
		mg dm ⁻³		----- cmol _c dm ⁻³ -----				dag kg ⁻¹	----- % -----		
Linha	4,5	11,2	53	0,29	0,44	0,98	3,9	1,19	80	3	17
Entrelinha	4,5	5,5	26	0,20	0,30	0,88	3,4	1,58	80	3	17

¹pH em água - relação 1:2,5; ²P e K - Extrator Mehlich-1; ³Ca²⁺ - Mg²⁺ - Al³⁺ - Extrator: KCl - 1 mol L⁻¹; ⁴(H+Al) - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0; ⁵MO (Matéria Orgânica).

Instalação do experimento

Povoamentos de eucalipto ao final da primeira rotação, adjacentes e plantados com o mesmo clone (híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), foram selecionados para instalação do experimento. Colhidos em setembro de 2013 com módulo de colheita Feller – Skidder e manejados sob talhadia (condução) e alto fuste (reforma). A reforma do talhão foi realizada em março de 2014 e seis meses depois o experimento foi instalado nos povoamentos sob ambos os manejos. Isso garantiu o estabelecimento das mudas na área de reforma, assim como da brotação das cepas na área manejada por condução. As avaliações do experimento foram feitas de outubro de 2014 a setembro de 2015. Os dados de temperatura e pluviosidade foram calculados para intervalos trimestrais correspondentes às coletas realizadas em estação meteorológica local (Quadro 2).

Quadro 2. Temperatura média e pluviosidade acumulada em intervalos trimestrais correspondentes ao período de realização do experimento.

Período	Temperatura	Pluviosidade
	°C	mm
Outubro 2014 - Dezembro 2014	26	80
Janeiro 2015 - Março 2015	26	524
Abril 2015 - Junho 2015	26	171
Julho 2015 - Setembro 2015	25	38
Outubro 2014 - Setembro 2015	26,09	776,22

Em cada manejo, condução e reforma, foi demarcada 1 parcela constituída de 10 linhas e 15 plantas por linha, no espaçamento 3,6 m x 2,4 m totalizando 1296 m² de área experimental.

Para avaliar a produção de raízes finas ao longo do tempo utilizou-se a técnica do “in growth core” (Jourdan et al., 2008). Para tal foram confeccionados aparatos metálicos cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura envoltos com tela de aço inox com malha externa de 2mm o que permitiu a entrada somente de raízes finas (< 2 mm) em seu interior.

A fim de avaliar a alteração do COS por meio da variação na abundância natural do ¹³C, solos cultivados com pastagens do gênero *Urochloa* (plantas com ciclo de carboxilação C4, portanto mais empobrecidas em ¹³C; $\delta^{13}\text{C} = -16,5\text{‰}$), foram coletados em área adjacentes a do estudo para serem inseridos nos aparatos. Isso permite determinar não apenas as mudanças no COS, mas estimar a proporção do COS que era

derivado das raízes finas do eucalipto; uma planta C3 com $\delta^{13}\text{C} = -25,5 \text{ ‰}$. Esse solo marcado por C4, livre de raízes, foi fertilizado (incorporado ao solo com auxílio de inchada) com 500 kg ha^{-1} de 12-20-16 e incubados em sacos plásticos durante 10 dias. Essa é a mesma fertilização aplicada ao eucalipto plantado na área.

Os aparatos foram preenchidos com o solo de pastagem (C4) e instalados na camada de 5 a 15 cm de profundidade do solo, distante 50 cm da planta na linha e entrelinha de plantio de ambos os sistemas de manejo (condução e reforma).

O delineamento amostral foi em medidas repetidas no tempo com dois manejos e cinco repetições. Para compor o tempo foram feitas amostragens destrutivas dos aparatos para quantificar o crescimento de raízes finas no solo aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses. Dessa forma, pôde-se quantificar a produção de raízes finas acumulada nos intervalos de 0-3, 0-6, 0-9 e 0-12 meses e nos intervalos trimestrais 0-3, 3-6, 6-9 e 9-12 meses. Nas amostragens trimestrais os aparatos tiveram as raízes e o solo do seu interior coletado e um novo aparato com solo de pastagem (C4) incubado (livre de raízes) foi reinstalado no campo com o intuito de avaliar a capacidade de renovação das raízes finas do eucalipto.

Preparo das amostras

As raízes finas que cresceram para dentro dos aparatos foram separadas do solo manualmente com ajuda de peneira e pinça, lavadas em água corrente para retirar o excesso de solo, secas em papel toalha e pesadas para quantificação de massa fresca. Após a pesagem, as raízes foram imersas em solução de HCl 3 % (v/v) por trinta segundos, novamente lavadas em água destilada (Bataglia et al., 1978) e armazenadas em álcool 30 % para posterior análise.

Em seguida as raízes foram secas a 40° C em estufa de circulação forçada de ar, até peso constante, para determinação da massa seca.

As raízes finas após a determinação da massa de matéria seca foram maceradas em moinho de bola, assim como o solo (livre de raiz), e os teores de C total e da razão isotópica do C foram determinados em espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS).

Foi calculada a média aritmética simples entre os valores de linha e entrelinha para cada regime de corte para obtenção dos valores médios das variáveis em estudo.

Análises dos dados

Crescimento e aporte de C ao solo pelas raízes finas

Produção de raízes finas

Para quantificar a produção de raízes finas foram utilizadas as amostras nos intervalos 0-3, 3-6, 6-9 e 9-12 meses, uma vez que se assume que não há ciclagem de raiz no período pré-estabelecido (Jourdan et al., 2008):

$$P_a = \sum_{j=1}^4 P_{3,j}$$

Em que:

P_a corresponde a produção de raízes finas ao longo de todo experimento (quatro intervalos trimestrais de coleta) ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

$P_{3,j}$ corresponde a produção de raízes finas após três meses de crescimento durante o período de amostragem j ($t \text{ ha}^{-1}$).

A taxa de incremento em massa de raízes finas ($t \text{ ha}^{-1}$) no tempo foi determinada pelo valor do parâmetro dependente (β_1) da regressão linear:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

Em que:

y é a variável dependente;

β_0 é o parâmetro independente;

β_1 é o parâmetro dependente;

X é o intervalo de coleta; e

ε é o erro associado ao modelo da regressão.

Renovação de raízes finas

A taxa de renovação de raízes para os doze meses de experimento foi calculada com base na equação de “*short - term in growth cores*” para intervalos trimestrais (Jourdan et al., 2008). Segundo esses autores, a taxa de renovação de raízes é dada pela razão entre a produção de raízes finas ao longo do experimento (P_a ; dado em $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e a média permanente de massa de raízes finas acumuladas (acumulado de raízes finas

no intervalo de 0-12 meses). A longevidade das raízes finas é calculada pelo inverso da taxa de renovação (Jourdan et al., 2008).

Aporte de C ao solo via raízes finas

O conteúdo de C aportado ao solo via raiz fina ($C_{\text{raiz fina ap. solo}}$) é dado pelo produto do aporte de raízes finas durante o ano ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e o teor de C dessas raízes. O aporte de raízes finas é dado pela diferença entre a produção de raízes finas ao longo do experimento (P_a , em $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e amassa de raízes finas acumuladas em igual período (acúmulo de raízes finas no intervalo de 0-12 meses).

C do solo derivado de raízes finas

A porção do C do solo derivado de raízes finas é obtido por:

$$C_{\text{solo derivado raiz}} = (C_{\text{liq.}} * Ds * f_r) * 100$$

Em que:

$C_{\text{solo derivado raiz}}$: C - total do solo que foi derivado da raiz do eucalipto (%);

$C_{\text{liq.}}$: C - total do solo subtraído do C - total do solo de pastagem (C4 de referência) no tempo zero ($C-C4 = 0,58 \%$; relação C:N = 8,08);

Ds: Densidade do solo em condição de campo (fora do aparato);

f_r : proporção de C do solo derivado das raízes de eucalipto calculada de acordo com Vitorello et al. (1989):

$$f_r = \frac{(\delta - \delta_0)}{(\delta_r - \delta_0)} * 100$$

Em que:

f_r : proporção de C do solo derivado das raízes finas de eucalipto (%);

δ : abundância natural de ^{13}C - C do solo;

δ_0 : abundância natural média de ^{13}C derivado do solo de pastagem (C4 tempo zero: $-16,49 \%$);

δ_r : abundância natural de ^{13}C das raízes finas de eucalipto ao final de 12 meses ($-25,5 \%$; relação C:N = 39,6).

A taxa de recuperação (%) do C da raiz pelo solo foi calculada pela razão entre o conteúdo de C do solo derivado das raízes finas ($C_{\text{solo derivado raiz}}$; $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e o aporte de C via raízes finas ao solo ($C_{\text{raiz fina ap. solo}}$; $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

Análises estatísticas

Os resultados de massa de matéria seca de raiz, teor de C da raiz, teor de C do solo e suas razões isotópicas foram submetidos à análise de variância e os dados submetidos ao teste de Tukey a 10 % de probabilidade.

As regressões lineares entre massa seca de raiz fina ao longo do tempo, entre C total do solo ao longo do tempo e entre a proporção de C do solo derivado das raízes finas de eucalipto (f_r) e o C total do solo foram ajustadas e testadas pelo teste t.

RESULTADOS

Produção, taxa de renovação e aporte de C ao solo pelas raízes finas

A massa de matéria seca de raízes finas de eucalipto acumulada ao longo do tempo foi crescente em ambos os sistemas de manejo (Quadro 3), com 0,69 e 1,59 t ha^{-1} aos doze meses para povoamentos de eucalipto sob condução e reforma, respectivamente.

Para os intervalos trimestrais a massa seca de raízes finas também é crescente ao longo do tempo no manejo sob reforma (Quadro 3). No entanto, manejada sob condução, a renovação de raiz foi praticamente constante, com massa seca de raízes finas de, aproximadamente, 0,42 t ha^{-1} por intervalo trimestral (Quadro 3).

A produção de raízes finas reflete na taxa de incremento médio de raízes finas, onde maiores incrementos de raízes são verificados para o eucalipto sob manejo de reforma, na ordem de 0,216 $\text{t ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ e para condução de 0,133 $\text{t ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ (Figura 1). A produção de raízes finas totalizou 2,14 $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o eucalipto manejado sob reforma e 1,67 $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para condução ao final do experimento (Quadro 4).

No entanto, o eucalipto sob manejo de condução apresentou a maior taxa de renovação média de raízes finas ao ano (2,40 ano^{-1}), o que lhe confere maior aporte de raízes finas ao solo (0,97 $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Para o eucalipto manejado sob reforma são verificados 1,35 ano^{-1} e 0,55 $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente, para taxa de renovação e aporte de raízes finas ao solo (Quadro 4).

Esses dados refletem na longevidade das raízes finas no solo, que alcança 5 meses para o manejo de condução e de 8,8 meses para a reforma.

Quadro 3. Massa seca (ms - raiz), teor de C (C - raiz) e razão isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ - raiz) médios de raízes finas de eucalipto e teor de C (C - solo) e razão isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ - solo) médios do solo sob eucalipto manejados sob condução e reforma acumulados ao longo do tempo e em intervalos trimestrais.

Manejo	Tempo	ms - raiz	C - raiz	$\delta^{13}\text{C}$ - raiz	C - solo	$\delta^{13}\text{C}$ - solo
	meses	t ha ⁻¹	%	‰	%	‰
Condução	0-3	0,49 Aa	42,4 Aa	-24,9	0,77 Aa	-15,9
	0-6	0,56 Aa	40,1 Ab	-24,3	0,74 Ba	-16,3
	0-9	0,67 Aa	42,4 Ba	-25,1	0,76 Aa	-17,0
	0-12	0,69 Ba	40,8 Aab	-25,3	0,71 Aa	-18,1
Reforma	0-3	0,18 Bc	38,9 Bc	-23,3	0,77 Aa	-15,9
	0-6	0,59 Ab	40,6 Abc	-24,4	0,79 Aa	-16,1
	0-9	0,75 Ab	44,8 Aa	-24,2	0,70 Bb	-17,2
	0-12	1,59 Aa	41,6 Ab	-25,7	0,65 Bb	-17,7
Condução	0-3	0,49 Aa	42,4 Aa	-24,9	0,77 Aa	-15,9
	3-6	0,28 Aa	38,2 Ab	-23,7	0,72 Ab	-17,0
	6-9	0,45 Aa	41,2 Aa	-24,1	0,81 Aa	-17,8
	9-12	0,45 Aa	42,3 Aa	-23,9	0,68 Ab	-17,6
Reforma	0-3	0,18 Bc	38,9 Bc	-23,3	0,77 Aa	-15,9
	3-6	0,44 Ab	37,6 Ab	-23,0	0,75 Aa	-17,0
	6-9	0,60 Aab	43,2 Aa	-24,2	0,59 Bb	-17,4
	9-12	0,92 Aa	38,5 Bb	-23,9	0,66 Ab	-17,5

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem quanto ao manejo do eucalipto dentro de um mesmo tempo de coleta de raízes finas do eucalipto pelo teste de Tukey ($p < 0,1$). Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si quanto ao tempo de coleta das raízes finas do eucalipto dentro de um mesmo manejo do eucalipto pelo teste de Tukey ($p < 0,1$).

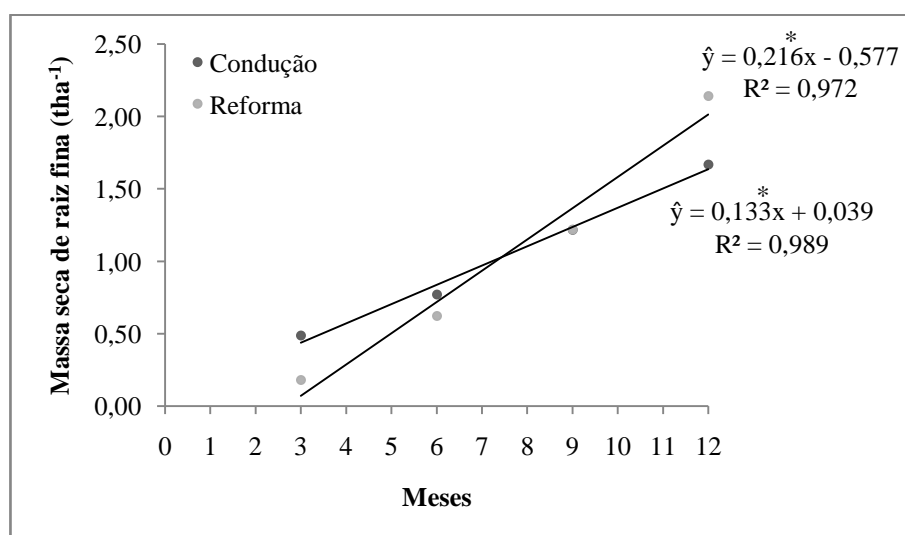


Figura 1. Taxa de incremento médio de raízes finas de eucalipto manejado sob condução e reforma em intervalos trimestrais acumulados ao longo do tempo. * Significativo pelo teste t a 5% de probabilidade.

Diante dos dados de produção, taxa de renovação, aporte de raízes finas e teor de C dessas raízes finas do eucalipto (que varia de 37,6 a 44,8 % da massa dessas raízes), têm-se o aporte de C ao solo via raízes finas ($C_{\text{raiz fina ap. solo}}$). Esse $C_{\text{raiz fina ap. solo}}$ alcança 0,40 e 0,23 t de C $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente para o eucalipto manejado sob condução e reforma (Quadro 4). Todavia, nem todo C aportado ao solo via raízes finas e seus exsudados se acumulam no solo.

Quadro 4. Produção (P_a), massa seca (ms - raiz), taxa de renovação, aporte de raízes finas, teor de C (C - raiz) e aporte de C ($C_{\text{raiz ap. solo}}$) médios de raízes finas do eucalipto ao solo manejado sob condução e reforma ao final de um ano.

Manejo	P_a	Ms - raiz *	Taxa renovação	Aporte de raízes finas	C - raiz	$C_{\text{raiz fina ap. solo}}$
	$\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$	$\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$	$\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$	$\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$	%	$\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$
Condução	1,67	0,69	2,40	0,97	41,43	0,40
Reforma	2,14	1,59	1,35	0,55	41,47	0,23

* Massa de matéria seca de raízes finas ao final de 12 meses (0-12 meses)

Carbono do solo derivado raízes finas

Ao final dos dozes meses de avaliação constatou-se que o C derivado das raízes finas do eucalipto contribuiu com 13 e 17 % do C total do solo, nos manejos de condução e reforma, respectivamente (Quadro 5). Isso acarretou em taxa de acúmulo de C derivado de raízes finas de 0,34 e 0,13 t $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente, para o eucalipto manejado sob condução e reforma (Quadro 5).

Quadro 5. Proporção de carbono do solo derivado de raízes finas de eucalipto (f_r) e carbono do solo derivado das raízes finas do eucalipto manejado sob condução e reforma.

Manejo	Tempo	f_r	$C_{\text{liq.}}$	Ds	$C_{\text{solo derivado raiz}}$
	Meses	%	%	g cm^{-3}	$\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$
Condução	0-3	-6	0,18	1,55	-0,17
	0-6	-2	0,16	1,55	-0,06
	0-9	6	0,17	1,55	0,16
	0-12	17	0,12	1,55	0,34
Reforma	0-3	-7	0,19	1,54	-0,19
	0-6	-5	0,21	1,54	-0,15
	0-9	7	0,12	1,54	0,14
	0-12	13	0,06	1,54	0,13

Verifica-se que 85 e 56 % do C aportado pelas raízes finas do eucalipto foi acumulado no solo sob eucalipto nos manejos de condução e reforma, respectivamente. No entanto, ao considerar que 50 % do C recuperado pelo solo são de exsudados radiculares (Rasse et al., 2005) têm-se que 42,5 e 28 % do C aportado pelas raízes finas são acumulados no solo, respectivamente, para o eucalipto manejado sob condução e reforma.

Quadro 6. Taxa de recuperação do C derivado de raízes finas do eucalipto manejado sob condução e reforma ao final de um ano.

Manejo	C _{raiz} aportado ao solo t ha ⁻¹ ano ⁻¹	C _{solo} derivado raiz t ha ⁻¹ ano ⁻¹	Taxa de recuperação	Taxa de recuperação
			C _{raiz+exsudados} pelo solo %	C _{raiz} pelo solo* %
Condução	0,40	0,34	85,0	42,5
Reforma	0,23	0,13	56,0	28,0

* Considerou-se que 50 % do C recuperado pelo solo advêm dos exsudados radiculares e os outros 50 % da senescência das raízes finas (Rasse et al., 2005).

Verificou-se aumento dos teores de C do solo com o incremento de raízes finas de eucalipto até os 7,3 e 8 meses, respectivamente, para os manejos sob reforma e condução (Quadro 3). Todavia, os teores de C do solo passam a reduzir a partir desse momento (Figura 2A).

Ao longo do tempo o C do solo derivado da pastagem (C antigo) adicionado ao aparato é substituído pelo C derivado das raízes finas do eucalipto. Isso é confirmado pela variação $\delta^{13}\text{C}$ do solo que passa de -15,9 ‰ para -18,1 no eucalipto sob condução e para -17,7 ‰ no solo sob eucalipto reformado, aos doze meses (Quadro 3). Diante disso, observou-se que à medida que aumentou a contribuição do C de raízes finas de eucalipto para o C do solo, os teores de C do solo foram reduzidos (Figura 2B).

DISCUSSÃO

Produção, taxa de renovação e aporte de C ao solo pelas raízes finas

Na fase inicial de crescimento os povoamentos de eucalipto investem não somente na parte aérea (folhas e galhos), mas também na formação do sistema radicular para sustentação e absorção de água e de nutrientes (Barros et al., 1997). O eucalipto manejado sob condução de brotação por apresentar sistema radicular parcialmente estabelecido, que atua como fonte de reservas orgânicas e minerais, proporciona maior produção de raízes finas nos primeiros meses. No entanto, passam a conduzir suas

reservas nas raízes finas (maior taxa de renovação) para sustentar novas brotações com o avançar da idade (Reis e Reis, 1997; Reis et al., 2006; Teixeira et al., 2002). Isso justifica as menores taxas de incrementos mensais de raízes finas do eucalipto manejado sob condução quando comparado ao manejo de reforma. De acordo com Janssens et al. (2002), as raízes finas precisam ser substituídas frequentemente para assegurar o bom funcionamento do sistema radicular.

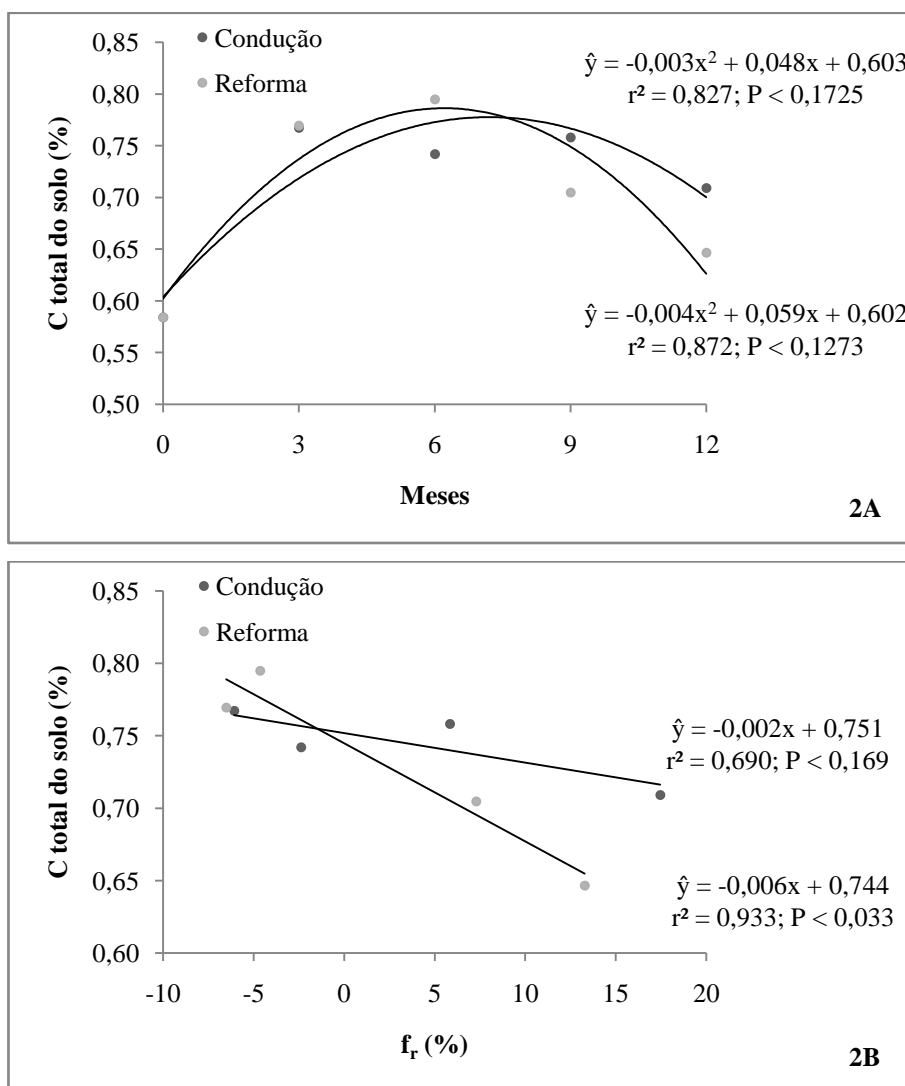


Figura 2.2A: Teores médios de C do solo para intervalos ininterruptos ao longo do tempo manejado sob condução e reforma. **2B:** Teores médios de C do solo em função da proporção de carbono do solo derivado das raízes finas do eucalipto para o solo manejado sob condução e reforma. Ajuste da regressão linear testada pelo teste t.

Já o eucalipto sob manejo de reforma necessita investir energia também em sistema radicular de sustentação, não somente para absorção de água e nutrientes. Isso esclarece a maior produtividade de raízes finas e menores taxas de ciclagem e renovação de raízes finas na fase inicial do ciclo.

Dados similares de produção e taxa de renovação de raízes finas foram verificados em estudos conduzidos com eucalipto no estado de São Paulo (Jourdan et al., 2008). Os autores verificaram produção de raízes finas na ordem de 2,42 e 2,14 t ha⁻¹ ano⁻¹ e taxas de renovação de 3,43 e 2,97 ano⁻¹, sem e com fertilização nitrogenada, respectivamente.

Trabalhos conduzidos na Europa com distintas espécies florestais também apresentaram resultados similares de produção de raízes finas, como exemplo tem-se o conduzido na Suécia com *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth e *Picea abies* (L) Karst, onde foi verificado produção de raízes finas de 0,73, 0,78 e 2,8 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente (Hansson et al., 2013). Cita-se também o estudo de Finér et al. (2011) que, em meta análise de dados da literatura global para avaliar a produção e taxa de renovação de raízes finas em três biomas florestais (boreal, temperada e tropical), verificou produção de raízes finas de 2,5, 3,3 e 2,3 t ha⁻¹ ano⁻¹ e de renovação de raízes de 1,3, 1,3 e 0,57 ano⁻¹, respectivamente para os biomas florestais.

A longevidade das raízes finas do atual estudo, 5 a 8,76 meses, foi maior que a encontrada por Jourdan et al. (2008), que variou de 3,5 a 4 meses, provavelmente por apresentar tipo de solo e clima diferentes. De acordo com Konôpa et al. (2005), para o desaparecimento de raízes finas, são necessárias duas condições básicas: a necrose e as condições climáticas (temperatura e umidade), satisfatórias para decomposição microbiana.

Apesar do eucalipto manejado sob condução proporcionar menor produção de raízes finas, o aporte de C derivado das raízes finas ao solo é maior, devido à maior taxa de renovação dessas raízes, que no manejo sob reforma. Como já mencionado, esse último investe não somente em raízes finas, mas também em raiz para sustentação. Consequentemente o aporte de C ao solo derivado das raízes finas do eucalipto, manejado sob condução, é maior que no manejo de reforma. As raízes finas têm vida útil mais curta do que as raízes grossas, devido à sua rápida produção, senescência e decomposição (Brunner e Godbold, 2007), o que contribui para o aumento do C do solo e remobilização de nutrientes para a parte aérea da planta, em especial a mineralização de N, P e S (Teixeira et al., 2002).

Jackson et al. (1997) em revisão da literatura a respeito da dinâmica das raízes finas em diferentes biomas, estimou que até 33% da produtividade primária anual das plantas é usado para a produção de raízes finas, que têm uma vida relativamente curta antes de morrer e começar a se decompor. A ciclagem de raízes é uma componente

chave para o fluxo de C e de nutrientes no solo. A planta quando mantém raízes velhas por mais tempo, menor taxa de renovação, movimenta menos C para a produção de novas raízes, porém gasta mais energia (respiração de raízes) em manutenção dessas raízes velhas que podem ser menos eficiente na absorção de nutrientes em comparação com uma raiz nova. Quando as raízes morrem e decompõem, parte do C é liberado para a atmosfera e outra parte fica imobilizada no solo como COS. Com isso, a renovação de raízes, em especial as finas, destaca-se como um dos principais componentes para fornecer C ao solo.

Semelhantemente Lai et al. (2016), em estudo conduzido na China com *Salix psammophila*, *Hedysarum mongolicum* e *Artemisia ordosica*, verificaram que a produção e taxa de renovação de raízes finas propicia acúmulo de C e fonte de nutrientes ao solo. No entanto, a maior produção e massa de raízes finas não necessariamente proporcionam maior estoque de C ao solo. Uma possível explicação seria que, além da ciclagem das raízes finas (Asaye e Zewdie, 2013), há contribuição de exsudados radiculares (Rasse et al., 2005) e da comunidade microbológica do solo para aumentar o acúmulo de C no solo.

O acúmulo de C do solo derivado de raízes finas depende de sua taxa de ciclagem que é afetada pela genética das plantas e fatores ambientais (Hobbie et al., 2010; Solly et al., 2014). Além disso, outros fatores como a qualidade do material aportado, maior superfície de contato das raízes com o solo, tipo de solo e o seu déficit de saturação de C também irão afetar o acúmulo de C no solo derivado de raízes finas (Hu et al., 2016; Lazzarini, 2014; Mazzilli et al., 2014; Rasse et al., 2005).

Carbono do solo derivado de raízes finas

Os dados de C do solo derivado das raízes finas do eucalipto amparam os resultados do aporte de C das raízes finas ao solo, pois o maior aporte de C derivado das raízes finas do eucalipto sob manejo de condução proporcionou maior acúmulo de C no solo que no manejado com reforma. Logo, a produção, taxa de renovação e aporte das raízes finas do eucalipto nos dois sistemas de manejo proporcionaram acúmulo de C ao solo (13 e 17 % do C total).

Os resultados revelam alta taxa de recuperação do C derivado das raízes finas, 56 e 85 % para eucalipto manejado sob reforma e condução, respectivamente. Rasse et al. (2005) destacam alguns mecanismos que favorecem o acúmulo de C derivados das raízes finas como a recalcitrância dos compostos que compõem as raízes (suberina,

cutina, etc), compostos esses que se ligam a fase mineral do solo deixando-os menos acessíveis aos microrganismos, além da proteção física conferida pelos agregados do solo e pela formação de complexos com íons metálicos.

No entanto, Rasse et al. (2005) estimam que aproximadamente 50 % do C do solo derivado das raízes finas advêm de exsudados radiculares e a outra metade da morte das raízes. Com isso, os resultados do atual estudo provavelmente superestimam a contribuição do C aportado pela massa de raízes finas para o C do solo.

Taxa de recuperação do C pelo solo similar a do atual estudo foi encontrada por Gale e Cambardella (2000) ao rotularem plantas de aveia com ^{14}C . Esses autores verificaram que o solo recuperou 42 % do C derivado de raiz de aveia e 16 % dos resíduos da parte aérea da planta após 360 dias de incubação. Já Bird e Torn (2006), em estudo de florestas de coníferas em clima temperado, constataram que, após 1,5 anos, aproximadamente 70 % do C derivado de raízes finas e 42 % do C da serapilhiera depositada sobre o solo foi recuperada. Bird e Torn (2006) relatam que, devido à maior proporção de C lábil no litter de coníferas, esse apresenta menor recuperação do C pelo solo quando comparado à raízes finas. A maior recalcitrância química dos tecidos das raízes é responsável pelo maior tempo de residência do seu C no solo (Crow et al., 2009). O mesmo ocorre no atual estudo onde a relação C:N das raízes (39,6) aportadas ao solo é maior que a do solo de pastagem (8,08). Deste modo, a decomposição do C do solo da pastagem é favorecida em relação ao C aportado pelas raízes finas que permanece mais tempo no solo e possivelmente são incorporados à fração mineral e/ou protegidos intra-agregados.

Apesar das raízes finas do eucalipto sob ambos os sistemas de manejos fornecerem C ao solo, o incremento das raízes finas e seus exsudados proporcionam a redução dos teores de C-total o que torna falsa a hipótese do estudo. O que provavelmente ocorreu foi um “Efeito Priming” (Fontaine et al., 2003; Kuzyakov, 2010; Xiao et al., 2015). O Efeito Priming é definido como o estímulo (+) ou supressão (-) da decomposição do COS por raízes vivas e microrganismos associados à rizosfera quando comparado às condições normais de decomposição ou supressão do COS sob as mesmas condições ambientais (Cheng et al., 2014).

No atual estudo, o incremento de raízes finas ao solo, assim como de seus exsudados na rizosfera, evidencia ser o principal promotor da mineralização do COS ao longo do tempo (Figura 2B). Isso é comprovado pela substituição do “C - velho” (C derivado do solo de pastagem - C4) pelo “C-novo” (C derivado das raízes finas do

eucalipto). O que provoca um provável Efeito Priming no COS. Fontaine et al. (2007) relatam que qualquer mudança no uso da terra e práticas agrícolas que aumentem a distribuição de C novo ao longo do perfil do solo pode estimular a decomposição do C antigo presente no solo, devido ao estímulo à comunidade microbiana. Além disso, o incremento de raízes finas e seus exsudados aumentam a disponibilidade de nutrientes do solo, o que também pode estimular a atividade microbiana, e proporcionam maior Efeito Priming no COS (Graff et al., 2014).

Resultados equivalentes foram verificados por Cheng et al. (2014) em meta-análise de dados da literatura a respeito da influência e interação dos microrganismos e raízes de plantas no Efeito Priming do COS. Os autores verificaram que o aumento de 20 % nos exsudados radiculares diminuiu em 5 % o COS, ao utilizar o modelo para estimar o Efeito Priming da rizosfera no solo. Embora a qualidade e a quantidade de exsudados de raízes finas são citadas como os principais responsáveis por controlar o Efeito Priming na rizosfera (Kuzyakov, 2010), os verdadeiros efeitos dos exsudados ainda são praticamente desconhecidos.

Mazzilli et al. (2014) ao estudar a contribuição do cultivo do milho e da soja para o C do solo em sistema de plantio direto também verificaram Efeito Priming do COS. Esses autores constataram que o input de C vegetal derivado do milho aumentou a decomposição do COS associado aos minerais, e que esse C vegetal foi mais estabilizado nessas frações do solo que o C vegetal derivado da soja. Os autores relatam que o input de C vegetal novo derivado do milho com alta relação C:N promove o crescimento de microrganismos que, predominantemente, degradam celulose, hemicelulose e lignina presentes no COS velho associado aos minerais e sugerem que a estabilização do C em diferentes frações do solo é controlada pela qualidade do material aportado e pelas propriedades do solo. Além disso, propõem que a maior estabilização do C de resíduos de milho no COS associado aos minerais pode estar relacionada com o grau de saturação de C do solo, pois os teores de COS estão próximos à saturação de C do solo e justificam a substituição do C velho (protegido) pelo C novo. O mesmo pode estar ocorrendo no atual estudo, onde o C velho da pastagem (protegido) está sendo substituído pelo C aportado pelas raízes finas do eucalipto.

O grau de saturação de COS é definido como a quantidade de C que pode ser protegido em associação à fração mineral (silte + argila) do solo e é dependente da textura e mineralogia do solo (Hassink, 1996; Stewart et al., 2009) além da qualidade do material aportado (Castellano et al., 2015). Em solos mais arenosos como os desse

estudo, a capacidade em acumular C é baixa (Hassink, 1996; Zinn et al., 2005) e possivelmente as frações finas (silte + argila) do solo já estejam saturadas com C o que justifica a substituição do C velho das pastagens pelo C novo das raízes finas do eucalipto. Nesse caso, a manutenção de resíduos de maior recalcitrância (teor de lignina, suberina, etc) passa a ser mais importante visto a menor superfície reativa disponível no solo para estabilização dos produtos da decomposição e exsudados das raízes finas do eucalipto. Ao longo da decomposição ocorre acúmulo de componentes alifáticos das raízes (lignina e suberina), enquanto carboidratos e proteínas são preferencialmente degradados (Crow et al., 2009; Grandy e Neff, 2008).

CONCLUSÕES

As raízes finas do eucalipto contribuem com 13 e 17 % do C total do solo, ao final de um ano, sob manejo de reforma e condução. No entanto, essa contribuição causa efeito priming no carbono orgânico do solo.

O solo possui alta taxa de recuperação do C aportado pelas raízes finas do eucalipto, em especial manejado sob talhadia.

Somente o aporte de C ao solo via raízes finas do eucalipto, durante a fase inicial de crescimento, não é suficiente para manter os teores totais de C do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asaye Z, Zewdie S. Fine root dynamics and soil carbon accretion under thinned and unthinned *Cupressus lusitanica* stands in, Southern Ethiopia. **Plant and Soil**, v. 366, p. 261–271, 2013.

Barros NF, Teixeira PC, Teixeira JL. Nutrição e produtividade de povoamentos de eucalipto manejados por talhadia. **Serie Técnica IPEF**, v. 30, p. 79–88, 1997.

Bataglia OC, Teixeira JPF, Furlani PR, Furlani AMC, Gallo JR. **Análise química de plantas**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1978. 31p. (Circular, 87).

Bird JA, Torn MS. Fine roots vs. needles: A comparison of ^{13}C and ^{15}N dynamics in a ponderosa pine forest soil. **Biogeochemistry**, v. 79, n. 3, p. 361–382, 2006.

Brunner I, Bakker MR, Björk RG, Hirano Y, Lukac M, Aranda X, Borja I, Eldhuset TD, Helmisaari HS, Jourdan C, Konôpka B, López BC, Miguel Pérez C, Persson H, Ostonen I. Fine-root turnover rates of European forests revisited: An analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. **Plant and Soil**, v. 362, n. 1-2, p. 357–372, 2013.

Brunner I, Godbold DL. Tree roots in a changing world. **Journal of Forest Research**,

v. 12, n. 2, p. 78–82, 2007.

Castellano MJ, Mueller KE, Olk DC, Sawyer JE, Six J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3200–3209, 2015.

Cheng W, Parton WJ, Gonzalez-Meler MA, Phillips R, Asao S, McNickle GG, Brzostek E, Jastrow JD. Synthesis and modeling perspectives of rhizosphere priming. **New Phytologist**, v. 201, n. 1, p. 31–44, 2014.

Crow SE, Lajtha K, Filley TR, Swanston CW, Bowden RD, Caldwell BA. Sources of plant-derived carbon and stability of organic matter in soil: Implications for global change. **Global Change Biology**, v. 15, n. 8, p. 2003–2019, 2009.

Finér L, Ohashi M, Noguchi K, Hirano Y. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 11, p. 2008–2023, 2011.

Fontaine S, Barot S, Barré P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. **Nature**, v. 450, n. 7167, p. 277–80, 2007.

Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 6, p. 837–843, 2003.

Gale WJ, Cambardella CA. Carbon dynamics of surface residue-and root-derived organic matter under simulated no-till. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 190–195, 2000.

Gatto A, Barros NF, Novais RF, Silva IR, Leite HG, Leite FP, Villani EMA. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1069–1079, 2010.

Graaff MA, Jastrow JD, Gillette S, Johns A, Wullschleger SD. Differential priming of soil carbon driven by soil depth and root impacts on carbon availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 69, p. 147–156, 2014.

Grandy AS, Neff JC. Molecular C dynamics downstream: The biochemical decomposition sequence and its impact on soil organic matter structure and function. **Science of the Total Environment**, v. 404, n. 2-3, p. 297–307, 2008.

Hansson K, Helmisaari HS, Sah SP, Lange H. Fine root production and turnover of tree and understorey vegetation in Scots pine, silver birch and Norway spruce stands in SW Sweden. **Forest Ecology and Management**, v. 309, p. 58–65, 2013.

Hassink J. Preservation of Plant Residues in Soils Differing in Unsaturated Protective Capacity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 2, p. 487, 1996.

Hobbie SE, Oleksyn J, Eissenstat DM, Reich PB. Fine root decomposition rates do not mirror those of leaf litter among temperate tree species. **Oecologia**, v. 162, n. 2, p. 505–

513, 2010.

Hu YL, Zeng DH, Mab XQ, Chang SX. Root rather than leaf litter input drives soil carbon sequestration after afforestation on a marginal cropland. **Forest Ecology and Management**, v. 362, p. 38–45, 2016.

Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 94, n. 14, p. 7362–7366, 1997.

Janssens IA, Sampson DA, Curiel-Yuste J, Carrara A, Ceulemans R. The carbon cost of fine root turnover in a Scots pine forest. **Forest Ecology and Management**, v. 168, n. 1-3, p. 231–240, 2002.

Jourdan C, Silva EV, Gonçalves JLM, Ranger J, Moreira RM, Laclau JP. Fine root production and turnover in Brazilian Eucalyptus plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 3, p. 396–404, 2008.

Kell DB. Large-scale sequestration of atmospheric carbon via plant roots in natural and agricultural ecosystems: why and how. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 367, n. 1595, p. 1589–1597, 2012.

Konôpka B, Yuste JC, Janssens IA, Ceulemans R. Comparison of fine root dynamics in Scots pine and Pedunculate oak in sandy soil. **Plant and Soil**, v. 276, n. 1-2, p. 33–45, 2005.

Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9, p. 1363–1371, 2010.

Lai Z, Zhang Y, Liu J, Wua B, Qin S, Fa K. Fine-root distribution, production, decomposition, and effect on soil organic carbon of three revegetation shrub species in northwest China. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 381–388, 2016.

Lal R. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools. **Energy and Environmental Science**, London, v. 1, p. 86-100, 2008.

Lazzarini PRC. **Substâncias húmicas extraídas de turfa associadas com N-ureia : influência no crescimento da cana-de-açúcar e nas transformações do N no solo** [dissertação]. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014, 82p.

Lima AMN, Silva IR, Neves JCL, Novais RF, Barros NF, Mendonça ES, Smyth TJ, Moreira MS, Leite FP. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 235, n. 1-3, p. 219–231, 2006.

Lynch JP, Wojciechowski T. Opportunities and challenges in the subsoil: Pathways to deeper rooted crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 8, p. 2199–2210, 2015.

Mazzilli SR, Kemanian AR, Ernst OR, Jackson RB, Piñeiro G. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 75, p. 273–281, 2014.

McNally SR, Laughlin DC, Rutledge S, Dodd MB, Six J, Schipper LA. Root carbon inputs under moderately diverse sward and conventional ryegrass-clover pasture: implications for soil carbon sequestration. **Plant Soil**, v. 392, p. 289–299, 2015.

Ostonen I, Lõhmus K, Pajuste K. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods. **Forest Ecology and Management**, v. 212, n. 1-3, p. 264–277, 2005.

Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson GP, Smith P. Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49–57, 2016.

Pulrolnik K, Barros NF, Silva IR, Novais RF, Brandani CB. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e Cerrado no vale do Jequitinhonha - MG. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125–1136, 2009.

Rasse DP, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and Soil**, v. 269, n. 1-2, p. 341–356, 2005.

Reis GG, Reis MGF, Fontan ICI, Monte MA, Gomes AN, Oliveira CHR. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 921–931, 2006.

Reis GG, Reis MGF. Fisiologia da brotação de eucalipto com ênfase nas suas relações hídricas. **Ipef**, v. 11, n. 30, p. 9–22, 1997.

Sanaullah M, Chabbi A, Leifeld J, Bardoux G, Billou D, Rumpel C. Decomposition and stabilization of root litter in top- and subsoil horizons: What is the difference? **Plant and Soil**, v. 338, n. 1, p. 127–141, 2011.

Solly EF, Schöning I, Boch S, Kandeler E, Marhan S, Michalzik B, Müller J, Zscheischler J, Trumbore SE, Schrumpf M. Factors controlling decomposition rates of fine root litter in temperate forests and grasslands. **Plant and Soil**, v. 382, n. 1-2, p. 203–218, 2014.

Stewart CE, Paustian K, Conant RT, Plante AF, Six J. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 2, p. 357–366, 2009.

Teixeira PC, Novais RF, Barros NF, Neves JCL, Teixeira JL. *Eucalyptus urophylla* root growth, stem sprouting and nutrient supply from the roots and soil. **Forest Ecology and Management**, v. 160, n. 1-3, p. 263–271, 2002.

Vitorello VA, Cerri CC, Andreux E, Feller C, Victória RL. Organic matter and natural

carbon-13 distribution in forested and cultivated Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 85, p. 773, 1989.

Xiao C, Guenet B, Zhou Y, Su J, Janssens IA. Priming of soil organic matter decomposition scales linearly with microbial biomass response to litter input in steppe vegetation. **Oikos**, v. 124, n. 5, p. 649–657, 2015.

Zinn YL, Lal R, Resck DVS. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 127, n. 1-2, p. 168–173, 2005.

Zinn YL, Lal R, Resck DVS. Eucalypt plantation effects on organic carbon and aggregation of three different-textured soils in Brazil. **Soil Research**, v. 49, n. 7, p. 614–624, 2011.

Capítulo 4

DINÂMICA DO CARBONO E FLUXO DE GASES EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO EM MINAS GERAIS

Resumo

A busca por estratégias que mitiguem os GEEs ganhou destaque nos últimos anos devido ao aquecimento global. Com isso, as florestas plantadas, principalmente de eucalipto, se destacam por apresentar grande acúmulo de carbono em sua biomassa, tanto de parte aérea como no sistema radicular. Porém, a dinâmica de acúmulo de carbono nos solos sob povoamentos de eucalipto não é muito clara, principalmente no que tange os fluxos de GEEs. Por tanto, o atual estudo tem como objetivo avaliar a dinâmica do carbono orgânico do solo e fluxos de gases em povoamentos de eucalipto ao final da rotação, após serem cultivados com variações na adubação e irrigação. O estudo foi realizado em Bocaiúva - MG. Escolheram-se povoamentos de eucalipto prestes a serem colhidos e um Cerrado nativo como referência. O cultivo do eucalipto foi realizado com e sem irrigação e com duas adubações diferenciadas. Foram abertas trincheiras de 100 cm de profundidade para coleta de solo e desses foram determinados os estoques de COT, NT e C-lável e calculou-se o Índice de Manejo do Carbono (IMC). Para a quantificação dos GEEs foram instaladas câmaras de PVC no solo nas linhas e entrelinhas de plantio. Os gases foram coletados nos intervalos de 0, 10, 20, 40 minutos com seringas 60 mL para posterior determinação das concentrações de CO₂ e CH₄. O delineamento experimental utilizado foi o de medidas repetidas, com cinco tratamentos e três repetições. O cultivo do eucalipto proporciona grande potencial de acumular C-total, atua como dreno de CO₂ e CH₄ da atmosfera, além de recuperar a qualidade do solo quando se avalia o perfil do solo como um todo.

Abstract

The search for strategies to mitigate GHGs gained attention in recent years due to global warming. Thus, planted forests, mainly fast growing short-rotation eucalyptus, stand out by having large accumulation of carbon in their biomass, both in the shoot and the root system. However, the dynamics of carbon accumulation in soils under eucalyptus stands is not very clear, nor there is consistent information regarding GHGs fluxes under tropical conditions. Therefore, the present study aimed at valuating the contents of soil organic carbon fractions and greenhouse gas (CO₂ and CH₄) fluxes in a eucalypt plantation at end of the rotation as affected by fertilization and irrigation treatments. Soil samples and soil surface gas fluxes were determined in stands of eucalyptus grown under rainfed or irrigated conditions, either with a conventional standard fertilization or an alternative heavier fertilization. Eucalyptus stands at pre-harvest age (7-yr old) have the potential to accumulate more soil organic C thus having large potential for draining atmospheric CO₂. They also act as drains for atmospheric CH₄ as we observed net influxes of this greenhouse gas in soils. Short-rotation eucalypt helps to improve soil quality by increasing SOM when evaluating the C accumulation and distribution in the soil profile is looked at as a whole, as compared to the soil under the native Cerrado vegetation.

INTRODUÇÃO

O atual cenário da mudança climática global tem despertado o interesse da comunidade científica para elaboração de estratégias que busquem diminuir e mitigar as emissões dos gases de efeito estufa (GEEs). No Brasil, a agricultura era responsável por grande parte das emissões dos GEEs, principalmente CO₂, CH₄ e N₂O, devido ao desmatamento e manejo intensivo do solo. No entanto, atualmente este cenário vem sendo alterado (INPE, 2015; Hansen et al., 2013). Porém não basta apenas reduzir as emissões é necessário elaborar estratégias que mitiguem os GEEs (Lal, 2008).

As florestas plantadas de eucalipto apresentam rápido crescimento e alta eficiência no uso de recursos, o que resulta em grande acúmulo de biomassa, tanto de parte aérea como do sistema radicular da planta (Stape et al., 2010). Essa alta eficiência de uso de recurso e conversão em biomassa confere a essas florestas potenciais efetivos em sequestrar CO₂ atmosférico com posterior estabilização no compartimento solo (Gatto et al., 2010). No entanto, a dinâmica de acúmulo de C em solos sob plantios florestais não é clara, principalmente no que se refere aos fluxos de GEEs.

Turner et al. (2005) estudando plantações de *Eucalyptus grandis* com idades de 0 a 35 anos, na Austrália, verificaram decréscimo do C orgânico do solo (COS) e afirmam que essa tendência ocorre até o final do ciclo da floresta. Já no Brasil, Zinn et al. (2002) encontraram perdas de COS sob plantio inicial de eucalipto em relação ao Cerrado nativo. No entanto, verificou-se recuperação ao fim da segunda rotação, conduzida por rebrota (Zinn et al., 2011). Lima et al. (2006) e Pulrolnik et al. (2009) em estudo do plantio de eucalipto em substituição à pastagens degradadas e Cerrado nativo, observaram potencial de sequestro de COS. Contudo, Fialho e Zinn (2014), em meta análise de dados de eucalipto no Brasil, não encontraram mudanças significativas no teor e estoque de COS sob eucalipto quando comparado a vegetações nativas. Concluíram que, em média, perdas de COS associado ao cultivo de eucalipto não são uma preocupação, porém, não há também tendências de sequestro de COS, mesmo em idades mais avançadas.

Consenso há de que técnicas de manejo que proporcionem menor revolvimento do solo, maior relação raiz/parte aérea (Rasse et al., 2005) e maior produtividade (Deckmym et al., 2004; Diekow et al., 2005; Gatto et al., 2011) podem contribuir para a maior acúmulo do COS. Porém, estudos no Brasil avaliando a dinâmica do COS, através dos fluxos de GEEs, em povoamentos de eucalipto ao final da rotação (prestes a serem colhidos) são escassos na literatura.

Dentre os fatores climáticos o déficit hídrico tem sido citado como fator mais limitante à obtenção de altas produtividades para o eucalipto (Gatto et al., 2010; Menezes, 2005; Stape et al., 2004) fato que resulta em menor produção de biomassa e acúmulo de COS. No entanto, o cultivo de espécies florestais com maior disponibilidade de água e, ou, fertilizantes, podem proporcionar aumento da produtividade (Stape et al., 2004) e aporte de resíduos ao solo (Leggett e Kelting, 2006), além de alterações na atividade microbiana do solo. O cultivo fertirrigado tem demonstrado maior eficácia em aumentar C e N no solo (Madeira et al., 2002; Li et al., 2007), possivelmente por estreitar a relação C:N e favorecer a estabilização da matéria orgânica do solo (Forrester et al., 2006). Com isso, tem-se um processo mais acelerado de decomposição dos restos culturais no solo, o que interfere na dinâmica do COS.

Alterações no conteúdo de COS estão associadas, sobretudo, às interações entre atributos físicos (revolvimento do solo, erosão), químicos (formação de complexos organo-minerais) e Biológicos (alteração da comunidade microbiana) (Santos et al., 2008). Em muitas situações, esses processos podem favorecer a síntese do COS, principalmente da fração humificada, e em especial em camadas mais profundas do solo (Vergutz et al., 2010). Isso pode ocorrer quando o aporte de resíduos vegetais ao solo é maior que a demanda por energia requerida pelos microrganismos e, ou, pela resíntese microbiana de compostos orgânicos em locais não originais. Caso contrário, pode haver consumo do C e emissão de CO₂ para atmosfera.

Desta forma o presente estudo tem como objetivo avaliar a dinâmica do carbono orgânico do solo e fluxos de gases em povoamentos de eucalipto ao final da rotação, após serem cultivados com variações na adubação e irrigação.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na cidade de Bocaiúva – MG, em áreas de propriedade da Vallourec unidade florestal. O local possui coordenadas geográficas 17° 20' de latitude (S) e 43° 50' de longitude (W) com altitude de aproximadamente 900 m. A temperatura média anual é de 23,6 °C e a precipitação média de 848 mm com estação seca bem pronunciada. Para realização do estudo foram escolhidos povoamentos de eucalipto com 7 anos de idade, prestes a serem colhidos, com espaçamento 3x3 m e um Cerrado nativo como referência, ambos sobre Latossolo Vermelho distrófico argiloso (Stape et al., 2010). O povoamento de eucalipto escolhido foi cultivado com e sem irrigação (I – irrigado; N – não irrigado) por aspersão, onde as parcelas com irrigação receberam em

média de 22,5 mm de água aplicada duas vezes por semana em área total, e com diferentes doses de adubação (parcela com adubação convencional (C) da empresa e parcela com adubação potencial (F) para alcançar maiores produtividades) (Quadro 1).

Quadro 1: Quantidade total de nutrientes aplicados de acordo com a adubação.

Adubação	N	P	K	Ca	Mg	B
	----- kg ha ⁻¹ -----					
Convencional*	79	55	66	280	60	6
Potencial	444	160	369	280	60	8

* Adubação padrão utilizada na empresa.

As adubações potenciais foram divididas em três aplicações ao ano, durante os três primeiros anos. O estudo foi realizado quando o manejo da irrigação já havia sido interrompido a aproximadamente um ano.

O delineamento experimental utilizado foi o de medidas repetidas, com cinco tratamentos (CN – adubação convencional, não irrigado; CI – adubação convencional, irrigado; FN – adubação potencial, não irrigado; FI – adubação potencial, irrigado e Cerrado nativo) e três repetições.

Em julho de 2014 foram realizadas as amostragens pontuais de gases e solos. Em cada parcela foram abertas seis trincheiras de 100 cm de profundidade e coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-100 cm, sendo três nas linhas e três nas entrelinhas de plantio.

Sub-amostras de solo (TFSA) foram trituradas e passadas em peneira de 100 mesh, para posterior determinação do teor de carbono total (C-total) e nitrogênio total (NT) pelo método da combustão seca em analisador elementar CHNS (modelo: Analyser 2400 series II, marca: Perkin Elmer Company), e do teor de carbono oxidável (C-lábil) por permanganato 0,033 mol L⁻¹ de acordo com metodologia descrita por Shang e Tiessen (1997). O estoque de C-total foi obtido pela soma dos estoques em cada camada de solo, calculados pelo produto do teor de C-total, densidade do solo e profundidade da respectiva camada em todas as repetições (Zinn et al., 2005).

Para a quantificação dos GEEs foram instaladas câmaras estáticas (anéis de PVC com 20 cm de altura e 500 mm de diâmetro) no solo a 5 cm de profundidade, com três repetições por parcela e nas linhas e entrelinhas de plantio. Na hora da amostragem, as câmaras foram hermeticamente fechadas com tampas de PVC dotadas de septo de borracha na parte superior, de modo que as mudanças de concentração dos GEEs

possam ser medidas ao longo do tempo. Os gases foram coletados nos intervalos de 0, 10, 20, 40 minutos com seringas 60 mL para posterior leitura por meio do equipamento Cavity Ring Down Spectroscopy – CRDS (Picarro, Sunnyvale, CA), equipamento este utilizado para a determinação das concentrações de CO₂, CH₄ e da razão isotópica dos gases.

A seguinte equação foi utilizada para o cálculo do fluxo dos GEEs (Smith e Conen, 2004):

$$\text{Fluxo dos gases (mg m}^{-2}\text{h}^{-1}) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} * M * \frac{(P * V)}{(R * T)} * \frac{1}{A} * 3,6$$

Em que:

$\Delta Q/\Delta t$: coeficiente angular (ppm/s), obtido do ajuste das concentrações ao longo do tempo;

M: massa molar do gás (g/mol);

P: pressão (1 atm);

V: volume de gás coletado (L);

R: constante dos gases (0,08205746);

T: temperatura (K);

A: área da câmara (m²);

Para cálculo do fluxo dos gases a umidade (%) e temperatura (°C) da camada superficial do solo foram mensuradas por meio do sensor EC-5 (Decagon Devices Inc., Pullman, WA) no momento da coleta dos gases. Também foram coletadas amostras de serapilheira aleatoriamente com o auxílio de gabarito (0,5 x 0,5 m), para posterior quantificação da massa seca (Quadro 2).

A partir dos resultados do estoque de C, calculou-se o índice de manejo do carbono (IMC) conforme (Blair et al., 1995):

$$\text{IMC (\%)} = \text{ICC} * \text{IL} * 100$$

Em que:

ICC: índice de compartimento de carbono, dado pela relação entre C-total da área cultivada e C-total da área de referência;

$$ICC = \frac{C - total_{euc}}{C - total_{mata}}$$

IL: índice de labilidade, dado pela relação da labilidade do C-total da área cultivada e a labilidade do C-total da área de referência, onde a labilidade do C-total é dada pela relação entre C-lábil e C-não lábil.

$$IL = \frac{L_{euc}}{L_{mata}}$$

Essa variável L, por sua vez, representa a labilidade do C, sendo calculada pela fórmula:

$$L = \frac{C_{lábil}}{C_{não lábil}}$$

Em que:

$C_{não lábil}$ é a diferença entre o C-total e o C- lábil

Quadro 2: Médias da massa de matéria seca da serapilheira, temperatura e umidade na superfície do solo sob o cultivo do eucalipto e Cerrado nativo.

Tratamento	Posição	Massa seca serapilheira	Temperatura	Umidade
		Mg ha ⁻¹	° C	%
Cerrado		3,99	27,6	7,7
CN	Linha	6,55	22,7	7,5
FN		7,57	20,1	9,0
CI		9,01	23,3	11,3
FI		8,44	22,6	9,8
CN		4,19	22,8	9,4
FN	Entre linha	6,48	18,9	10,3
CI		7,30	23,1	9,6
FI		5,16	22,7	7,3

CN: cultivo do eucalipto com adubação convencional não irrigado; CI: cultivo do eucalipto com adubação convencional irrigado FN: cultivo eucalipto com adubação potencial não irrigado; FI: cultivo do eucalipto com adubação potencial irrigado; Cerrado nativo.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e os dados submetidos ao teste de Tukey a 10 % de probabilidade. Os valores de IMC e C-total particionado

foram comparados utilizando o teste de Dunnett ($p < 0,05$), onde se compara cada tratamento a uma referência pré-determinada.

RESULTADOS

Estoques de Carbono e Nitrogênio total do solo

Os maiores ($p < 0,1$) estoques de C-total foram observados na camada superficial do solo (0-10 cm), independente dos tratamentos (Quadro 3). Verificou-se maiores estoques de C-total para o Cerrado nativo e eucalipto não irrigado quando comparado com o eucalipto irrigado. Embora os estoques sejam menores nas camadas mais profundas no perfil do solo, existem diferenças entre os tratamentos, com maiores estoques para o solo sob eucalipto (independente da irrigação) em comparação ao solo de Cerrado nativo (Quadro 3).

Quando os estoques de C-total do perfil do solo (0-100 cm) são particionados em C-lábil e C-não lábil, verificam-se que todos os tratamentos diferem ($p < 0,05$) do Cerrado nativo somente para o C-não lábil (Figura 1). Apesar de não haver diferença entre os estoques de C-lábil do solo (camada 0-100) este corresponde a 27, 19, 20, 22 e 24 % do estoque de C-total do Cerrado, CN, FN, CI e FI, respectivamente (Figura 1). Quando o estoque de C-lábil é avaliado por camada de solo, o Cerrado nativo difere dos tratamentos sob eucalipto, somente na camada superficial do solo (0-10 cm) (Quadro 3).

O NT na camada superficial do solo (0-10 cm) segue a mesma tendência observada para o C-total. Verifica-se diferença ($p < 0,1$) somente na camada de 0-10 cm entre o Cerrado e os tratamentos de eucalipto irrigado (Quadro 3).

A relação C:N dos solos sob eucalipto que receberam adubação convencional, independente da irrigação, diferem ($p < 0,1$) do Cerrado nativo somente na camada de 60-100 cm (Quadro 3).

Fluxos de CO₂ e CH₄

Efluxos de CO₂ evoluídos dos solos são verificados para todos os tratamentos (Figura 2). As maiores ($p < 0,1$) emissões de CO₂ são observados para o Cerrado nativo quando comparado com os tratamentos sob eucalipto (Figura 2). Apesar das menores emissões de CO₂ os tratamentos sob eucalipto apresentam diferenças substanciais quanto à posição (linha e entre linha) de coleta dos gases (Figura 2). Os solos sob eucalipto sem irrigação (CN e FN) apresentam os maiores valores de efluxos de CO₂ na

linha de plantio quando comparados a entrelinha. Já para os tratamentos que receberam irrigação (CI e FI) o inverso é constatado (Figura 2).

Quadro3. Estoques de carbono total (C-total), nitrogênio total (NT), relação C:N e carbono lábil (C-lábil) por camada de solo, sob cultivo de eucalipto e Cerrado nativo.

		C – total			
Camada	Cerrado	CN	FN	CI	FI
cm	----- Mg ha ⁻¹ -----				
0 - 10	49 a	44 a	47 a	35 b	34 b
10 - 20	32 a	36 a	33 a	36 a	31 a
20 - 40	37 c	57 a	56 a	50 ab	47 b
40 - 60	36 b	43 ab	47 a	45 ab	42 ab
60 - 100	39 b	71 a	74 a	67 a	66 a

		N - total			
Camada	Cerrado	CN	FN	CI	FI
cm	----- Mg ha ⁻¹ -----				
0 - 10	3,1 a	1,6 ab	2,3 b	1,4 b	1,4 b
10 - 20	2,5 a	1,5 a	2,1 a	1,4 a	1,4 a
20 - 40	1,9 a	2,7 a	2,1 a	2,0 a	2,7 a
40 - 60	1,7 a	1,1 a	1,4 a	1,3 a	1,8 a
60 - 100	2,5 a	2,1 a	2,6 a	1,8 a	3,1 a

		Relação C:N			
Camada	Cerrado	CN	FN	CI	FI
cm	----- Mg ha ⁻¹ -----				
0 - 10	16 a	28 a	21 a	26 a	25 a
10 - 20	13 a	27 a	16 a	26 a	23 a
20 - 40	20 a	23 a	28 a	26 a	19 a
40-60	25 a	31 a	37 a	30 a	24 a
60-100	15 b	38 a	30 ab	41 a	28 ab

		C - lábil			
Camada	Cerrado	CN	FN	CI	FI
cm	----- Mg ha ⁻¹ -----				
0-10	16 a	8 b	10 b	8 b	9 b
10-20	8 a	7 a	8 a	8 a	7 a
20-40	9 a	14 a	12 a	13 a	13 a
40-60	7 a	8 a	9 a	9 a	10 a
60-100	12 a	10 a	14 a	14 a	14 a

CN: cultivo do eucalipto com adubação convencional não irrigado; CI: cultivo do eucalipto com adubação convencional irrigado FN: cultivo eucalipto com adubação potencial não irrigado; FI: cultivo do eucalipto com adubação potencial irrigado; Cerrado nativo. Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,1$).

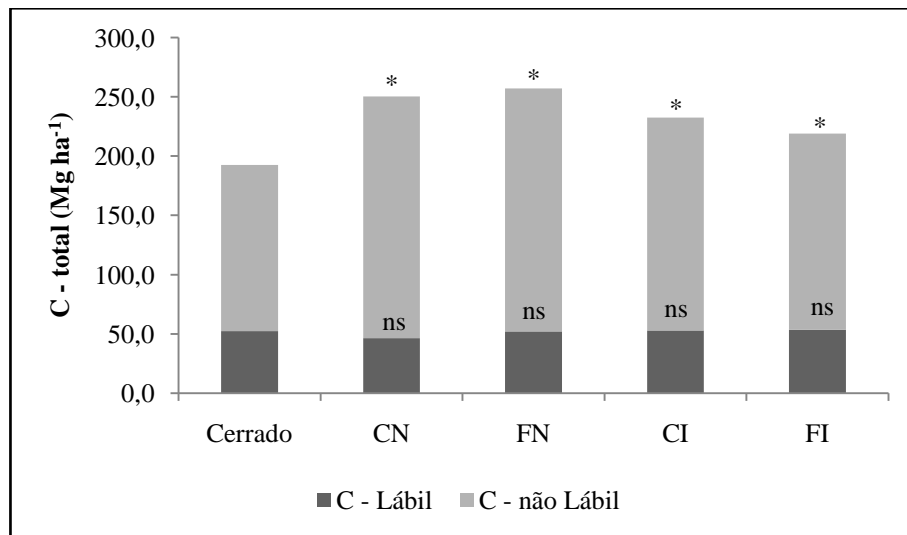


Figura 1. Estoques de carbono total (C-total) do solo particionado em C-lábil e C-não lábil na camada 0-100 cm. CN: cultivo do eucalipto com adubação convencional não irrigado; CI: cultivo do eucalipto com adubação convencional irrigado FN: cultivo eucalipto com adubação potencial não irrigado; FI: cultivo do eucalipto com adubação potencial irrigado; Cerrado nativo. * Significativo pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

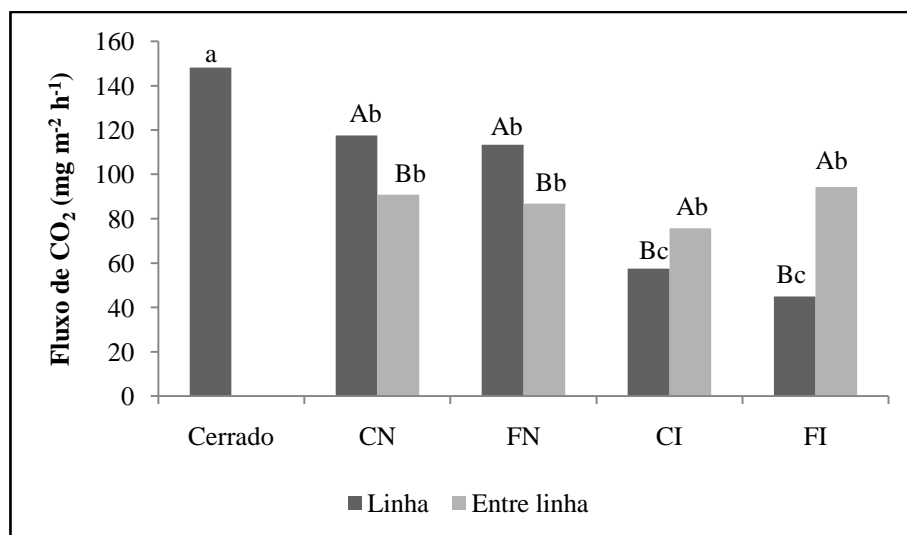


Figura 2. Fluxos médios de CO₂ evoluídos do solo. CN: cultivo do eucalipto com adubação convencional não irrigado; FN: cultivo eucalipto com adubação potencial não irrigado; CI: cultivo do eucalipto com adubação convencional irrigado; FI: cultivo do eucalipto com adubação potencial irrigado; Cerrado nativo. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem quanto à posição de amostragem dentro de um mesmotratamento pelo teste de Tukey ($p < 0,1$). Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si quanto aos tratamentos dentro de uma mesma posição de amostragem pelo teste de Tukey ($p < 0,1$).

Já em relação aos fluxos de CH₄, independente dos tratamentos, todos os solos proporcionam influxo de CH₄ (Figura 3), ou seja, o solo comporta-se, no geral, como um dreno de CH₄ atmosférico. Também há diferença ($p < 0,1$) quanto à posição de coleta dos gases evoluídos dos solos para o influxo de CH₄ assim como observado para

o CO₂ (Figura 3). Na linha de plantio verifica-se que o solo sob eucalipto não irrigado (CN e FN) proporciona maiores ($p < 0,1$) influxos de CH₄ do quando comparado ao Cerrado nativo e do eucalipto irrigado (CI e FI) (Figura 3). Já na entrelinha de plantio não são observadas diferenças ($p < 0,1$) entre os tratamentos.

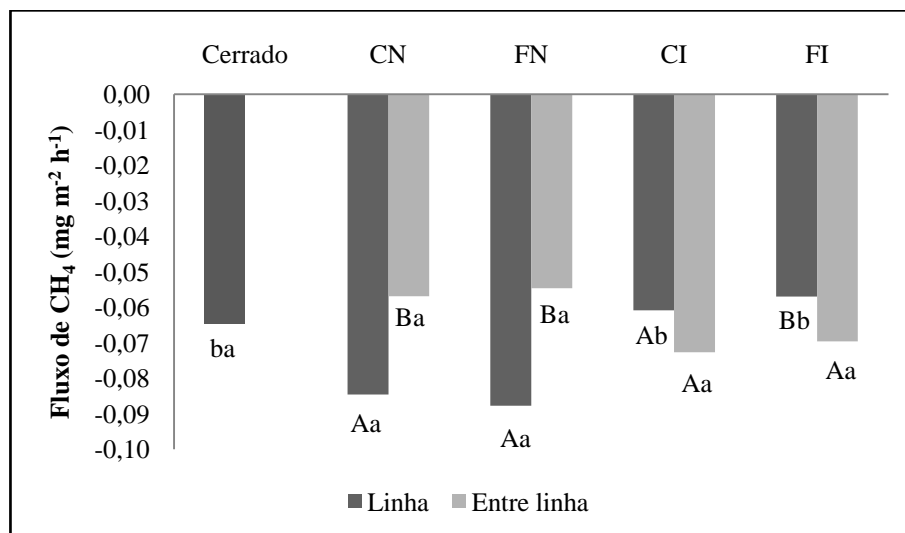


Figura 3. Influxos médios de CH₄ evoluídos do solo. CN: cultivo do eucalipto com adubação convencional não irrigado; FN: cultivo eucalipto com adubação potencial não irrigado; CI: cultivo do eucalipto com adubação convencional irrigado; FI: cultivo do eucalipto com adubação potencial irrigado; Cerrado nativo. Letras minúsculas relacionam os tratamentos e letras maiúsculas as posições em um mesmo tratamento. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem quanto à posição de amostragem dentro de um mesmotratamento pelo teste de Tukey ($p < 0,1$). Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si quanto aos tratamentos dentro de uma mesma posição de amostragem pelo teste de Tukey ($p < 0,1$).

Índice de Manejo de Carbono

Na camada superficial do solo verifica-se que todos os tratamentos sob eucalipto, independente da irrigação e adubação, apresentam IMC inferior ($p < 0,05$) a 100% (Figura 4). No entanto, quando são consideradas as camadas mais profundas do perfil do solo, o IMC dos tratamentos sob eucalipto superam os 100% do Cerrado, porém não são observadas diferenças ($p < 0,05$) entre os tratamentos (Figura 4).

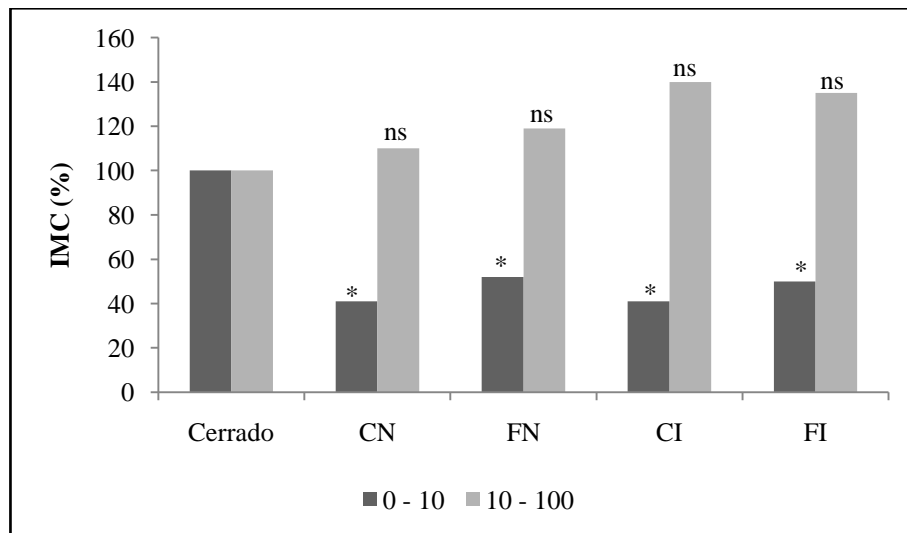


Figura 4. Índice de manejo de carbono do solosob cultivo do eucalipto e Cerrado nativo. CN: cultivo do eucalipto com adubação convencional não irrigado; FN: cultivo eucalipto com adubação potencial irrigado; CI: cultivo do eucalipto com adubação convencional irrigado; FI: cultivo do eucalipto com adubação potencial irrigado; Cerrado nativo; IMC: Índice de manejo de carbono. *Significativo pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

DISCUSSÃO

Estoque de Carbono e Nitrogênio

Nos solos sob eucalipto a presença da irrigação ativa a microbiota do solo, conseqüentemente, favorece a decomposição dos resíduos mais lábeis, raízes finas e carreta em um “efeito priming”, o qual pode contribuir para a imobilização do C-total a longo prazo. Segundo Fontaine et al. (2003 e 2004), alterações na qualidade do COS podem ocasionar intensificação no processo de decomposição de compostos orgânicos primários (resíduos vegetais e raízes finas), causando “efeito priming” no C-total. Durante o processo de decomposição os microrganismos utilizam o carbono em seu metabolismo e o excedente é perdido por respiração na forma de CO_2 (Six et al., 2006). Portanto, a comunidade microbiana é um fator-chave na dinâmica do C-total, pois controla a disponibilidade de nutrientes, a liberação e/ou o acúmulo de C-total.

Já para os solos sob eucalipto que não receberam irrigação os maiores estoques de C-total provavelmente se devem ao investimento em sistema radicular mais profundo, devido à necessidade de explorar um maior volume de solo para captar água quando comparado ao eucalipto irrigado. Reis et al. (1985) observaram em povoamentos de *E. grandis* que o acúmulo de biomassa radicular foi maior num sítio de pior qualidade (solo sob déficit hídrico) quando comparado a outro sítio de melhor qualidade (sem déficit hídrico). Também verificaram que na condição de menor

disponibilidade de água e nutrientes as árvores tendem a aumentar a partição de carbono nas raízes para aumentar sua superfície de aquisição de água, corroborando com este estudo.

A quantificação dos estoques de C-total não fornece valores extrapoláveis para diferentes situações de manejo, locais, climas e solos (Nicoloso et al., 2008). Neste aspecto, o C lábil é aquele constituinte do C-total mais facilmente mineralizado pela microbiota do solo (Rangel et al., 2008), portanto, diretamente associado à liberação de CO₂ para atmosfera. Já o C não lábil é constituído, geralmente, por materiais mais humificados, estabilizados pela ligação direta entre as frações orgânicas e minerais do solo (Golchin et al., 1994). A maior contribuição do C não lábil para o C-total no perfil do solo (0-100 cm) se deve, provavelmente, a dois motivos: 1) Interações organo-minerais que proporcionam proteção química ao C-total, já que se trata de um Latossolo bem desenvolvido com teor de argila, óxidos de Fe e Al elevados; 2) Maior relação C:N observada sob eucalipto nas camadas mais profundas do solo, predominando um C mais recalcitrante o qual dificulta a decomposição do mesmo.

Quando são consideradas as camadas de solo o Cerrado se destaca com os maiores estoques de C-lábil e NT na camada superficial (0-10 cm). Isso se deve à diversidade da qualidade do material aportado, uma vez que a composição do Cerrado nativo se dá por um estrato herbáceo, que coexiste de arbustos e árvores esparsas, com cobertura arbórea de 10 a 60% (Eiten, 1972), além de possuir gramíneas espécies com menores relações C:N em sua composição, diferentemente do material homogêneo dos cultivos do eucalipto. Porém o solo sob eucalipto irrigado que recebeu adubação potencial apresenta valores expressivos de estoques de NT em camadas subsuperficiais, que podem ser explicados por: 1) O N lixiviado no perfil do solo através da água de irrigação pode ter interagido com o C-total do solo e as rizodeposições proporcionando uma maior estabilização do C e N no perfil do solo (Nommik e Vahtras, 1982; Kelley e Stevenson, 1996; Dijkstra et al., 2004). As maiores quantidades de N absorvidas pelas plantas de eucalipto incrementaram a produção de biomassa de raiz permitindo a estocagem de C e N em maiores profundidades do solo (Stape et al., 2004).

Devido aos baixos estoques de NT e maiores de C-total na camada de 60-100 cm, os solos sob eucalipto que receberam adubação convencional (independente da irrigação) são os que apresentaram maior relação C:N. Maiores relações C:N (41 e 38) e também em maiores profundidades (limitação de O₂), conferem ao CI e CN um C mais recalcitrante e menos acessível à ação microbiana, o que favorece seu acúmulo no solo.

Segundo Luchese et al. (2002) a relação C:N é considerada importante reguladora da decomposição do C-total e fornece informações importantes sobre seu estado de humificação e/ou potencial de mineralização (Potter e Klooster, 1997). Os valores dessa relação podem determinar se a atividade microbológica é mais ou menos intensa (Sousa, 2003). Lamparter et al. (2009), em estudo a respeito da estabilização do COS, observaram que a taxa de mineralização do C decresceu com o aumento da relação C:N. No atual estudo, para os solos sob eucalipto que receberam adubação potencial (independente da irrigação) o N provavelmente é carregado para as camadas mais profundas do solo e promove uma menor relação C:N.

Fluxos de CO₂ e CH₄

O Cerrado nativo, por apresentar os maiores estoques de C-total e C-lábil na camada superficial do solo (0-10 cm), proporcionou as maiores emissões de CO₂ desprendidos do solo. Além disso, o menor aporte de serapilheira e a conseqüente maior temperatura (Quadro 2), aliado a uma qualidade mais heterogênea do seu estratovegetal, em relação ao solo sob eucalipto, contribui para os maiores efluxos de CO₂ do solo. O menor aporte vegetal ao solo origina temperaturas mais elevadas e a conseqüente maior ação de microrganismos decompositores proporcionando maiores emissões de CO₂ para atmosfera (Costa et al., 2008). Segundo Ussiri e Lal (2009) o efeito da cobertura do solo na redução da temperatura é um fator controlador da emissão de CO₂, uma vez que a atividade microbiana é acelerada com aumentos na temperatura do solo e a conseqüente taxa de mineralização do carbono é maior. Dependendo da quantidade e da distribuição da cobertura vegetal no solo, a temperatura da superfície pode ser reduzida em até 4 °C (Lou et al., 2011).

Já para os solos sob eucalipto, a provável diferença de distribuição do sistema radicular no perfil do solo acarreta em alterações nos fluxos de CO₂ e CH₄ quanto ao local (linha e entrelinha de plantio) de amostragem dos gases. Devido à menor disponibilidade de água, os tratamentos sob eucalipto não irrigado (CN e FN) possivelmente investem mais em sistema radicular, principalmente mais verticalizado, e conseqüentemente apresentam maiores efluxos de CO₂ (maior contribuição autotrófica) na linha de plantio quando comparados a entrelinha. Segundo Gonçalves e Passos (2000), a maior partição de carbono para as raízes (maior relação raiz/parte aérea), quase sempre associada ao aprofundamento do sistema radicular, possibilita captação de água em camadas mais profundas do solo. Para auxiliar contra a falta de água as plantas

utilizam algumas estratégias como perda das folhas e ou diminuição da área foliar, redução da transpiração, perda das raízes superficiais e proliferação das profundas (Reis et al., 2006) e ajustamento osmótico para manutenção do turgor celular (Carvalho, 2005), o que pode resultar em menor umidade do solo e, conseqüentemente, menor poder de oxidar CH_4 . Entretanto, para os solos sob eucalipto irrigado (CI e FI) as plantas não necessitam de investir em sistema radicular, pois a irrigação é por aspersão em área total e o sistema radicular tende a ser mais horizontalizado, proporcionando maiores fluxos de gases na entrelinha quando comparado a linha de plantio. Neilsen et al. (2000) ao comparar a distribuição das raízes em macieiras com sete anos, sob distintos sistemas de irrigação, observaram que as árvores sob irrigação por aspersão se caracterizaram por sistema radicular superficial de distribuição mais uniforme. Sant'ana et al. (2012) concluíram que a distribuição das raízes da bananeira prevalece na camada superficial do solo quando irrigada por aspersão.

A limitada disponibilidade de água também favorece a aeração do solo e promove o aumento da atividade das bactérias metanotróficas e o conseqüente influxo de CH_4 no solo. Segundo Boeckx et al. (1997), solos arenosos geralmente têm maior poder de oxidação do que solos argilosos, devido às melhores condições de aeração. O processo de influxo do CH_4 é conseqüência da oxidação de CH_4 por bactérias metanotróficas do solo que, em condições aeradas, utilizam o CH_4 como fonte de C e energia (Le Mer e Roger, 2001; Saggar et al., 2008). Jacinthe e Lal (2005), em estudo sobre a oxidação do CH_4 em diferentes manejos de lavouras, concluíram que solos que sofreram algum tipo de manejo necessitam de décadas para restaurar parcialmente a capacidade de oxidação do CH_4 . Relatam também que a lenta recuperação da capacidade de sequestrar CH_4 é um indicativo do dano causado ao nicho das bactérias metanotróficas do solo e que este dano é difícil de ser revertido (Sitaula et al., 2000). Porém no atual estudo, o cultivo do eucalipto evidencia um grande potencial em sequestrar CH_4 da atmosfera e supera o Cerrado nativo de referência nos influxos de CH_4 , além de atuar como dreno de CO_2 da atmosfera quando são consideradas emissões líquidas de CO_2 .

Índice de Manejo de Carbono

O IMC é utilizado como indicativo do impacto do uso e das práticas de manejo do solo sobre os teores e qualidade do COS. Como os valores de IMC são baseados em uma referência, no caso do atual estudo o Cerrado nativo, quanto mais próximos ou

superiores a 100 %, indicam que as alterações do COS se aproximam do ideal ou até mesmo melhoram as condições no solo (Blair et al., 1995).

O Cerrado nativo por apresentar os maiores estoques de C-total e C-lábil na camada superficial do solo e à grande heterogeneidade de espécies vegetais que contribui para uma melhor qualidade do resíduo aportado sob a superfície do solo difere do monocultivo do eucalipto quanto ao IMC. Inácio (2009) e Portugal et al. (2008) encontraram valores inferiores a 100% de IMC para eucalipto, pastagem e pinus, e para citros, seringueira e pastagem, respectivamente, para as camadas superiores do solo. Estes autores concluíram que este fato é decorrente da maior heterogeneidade e qualidade do material aportado ao solo sob vegetação nativa de referência. No entanto, no atual estudo, quando são consideradas as camadas mais profundas do solo, o cultivo do eucalipto recupera a qualidade do COS, pois apresenta sistema radicular mais desenvolvido, aporta grandes quantidades de resíduos ao solo e menores fluxos de GEEs.

CONCLUSÕES

O cultivo do eucalipto irrigado e não irrigadas, ao final do ciclo, acumula mais C ao solo que o Cerrado nativo.

O cultivo do eucalipto, ao final do ciclo, atua como dreno de CH₄ e de CO₂ da atmosfera quando são consideradas emissões líquidas.

O cultivo do eucalipto, ao final do ciclo, recupera a qualidade do solo quando se avalia o perfil do solo como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blair G, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 46, n. 7, p. 1459, 1995.

Boeckx P, Van Cleemput O, Villaralvo I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 49, p. 91–95, 1997.

Carvalho CJR. Respostas de plantas de *Schizolobium amazonicum* [S. parahyba var. *amazonicum*] e *Schizolobium parahyba* [*Schizolobium parahybum*] à deficiência hídrica. **Revista Árvore**, v. 29, n. 6, p. 907–914, 2005.

Costa FS, Bayer C, Zanatta JA, Mielniczuk J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 323–332, 2008.

Deckmyn G, Muys B, Quijano JG, Ceulemans R. Carbon sequestration following afforestation of agricultural soils: comparing oak/beech forest to shortrotation poplar coppice combining a process and a carbon accounting model. **Glob. Change Biol.**, 10:1482-1491, 2004.

Diekow J, Mielniczuk J, Knicker H, Bayer C, Dick DP, Knabner IK. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant Soil**, v. 268, p. 319-328, 2005.

Dijkstra FA, Hobbie SE, Knops JMH, Reich PB. Nitrogen deposition and plant species interact to influence soil carbon stabilization. **Ecology Letters**, v. 7, n. 12, p. 1192–1198, 2004.

Eiten G. The Cerrado vegetation of Brazil. **Bot Rev**, v. 38, n. 2, p. 201–338, 1972.

Fialho RC, Zinn YL. Changes in soil organic carbon under Eucalyptus plantations in Brazil: A comparative analysis. **Land Degradation & Development**, v. 25, n. 5, p. 428–437, 2014.

Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 6, p. 837–843, 2003.

Fontaine S, Bardoux G, Abbadie L, Mariotti A. Carbon input to soil may decrease soil carbon content. **Ecol. Letters**, 7: 314-320, 2004.

Forrester DI, Bauhus J, Cowie AL. Carbon allocation in a mixed-species plantation of Eucalyptus globulus and Acacia mearnsii. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 275-284, 2006.

Gatto A, Barros NF, Novais RF, Silva IR, Leite HG, Leite FP, Villani EMA. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1069–1079, 2010.

Gatto A, Barros NF, Novais RF, Silva IR, Leite HG, Villani EMA. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 35, p. 895–905, 2011.

Golchin A, Oades JM, Skjemstad JO, Clarke P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, v.32, p.285-309, 1994.

Gonçalves MR, Passos CAM. Crescimento de cinco espécies de eucalipto submetidas a déficit hídrico em dois níveis de fósforo. **Ciencia Florestal**, v. 10, p. 145–161, 2000.

Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Hancher M, Turubanova SA, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice CO, Townshend JRG. High-resolution global maps of forest cover change. **Science**, v. 342, n. 6160, p. 850–853, 2013.

Inácio E. **Distribuição vertical de carbono orgânico em Latossolo sob diferentes usos** [tese]. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009. 86 p.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Taxas anuais do desmatamento - 1988 até 2014. Acesso em: Abril 2015. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2014.htm>.

Jacinthe PA, Lal R. Labile carbon and methane uptake as affected by tillage intensity in a Mollisol. **Soil and Tillage Research**, v. 80, n. 1-2, p. 35–45, 2005.

Kelley KR, Stevenson FJ. Organic forms of N in soil. In: Piccolo A. Humic Substances in Terrestrial Ecosystems. **Elsevier**, 1996. p.407-427.

Lal, R. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools. **Energy and Environmental Science**, London, v. 1, p. 86-100, 2008.

Lamparter A, Bachmann J, Goebel MO, Woche SK. Carbon mineralization in soil: Impact of wetting-drying, aggregation and water repellency. **Geoderma**, v. 150, n. 3-4, p. 324–333, 2009.

Legget ZH, Kelting DL. Fertilization effects on carbon pools in loblolly pine plantations on two upland sites. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, n.1, p.279-286, 2006.

Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. **Europe Journal Soil Biol.**, v. 37, n. 2001, p. 25–50, 2001.

Li S, Han S, Zhang Y. Foliar decomposition in a broadleaf-mixed Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. Et Zucc) plantation forest: the impact of initial litter quality and the decomposition of three kinds of organic matter fraction on mass loss and nutrient release rates. **Plant Soil**, 295:151-167, 2007.

Lima AMN, Silva IR, Neves JCL, Novais RF, Barros NF, Mendonça ES, Smyth TJ, Moreira MS, Leite FP. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 235, n. 1-3, p. 219–231, 2006.

Lou Y, Liang W, Xu M, Ele X, Wang Y, Zhao K. Straw coverage alleviates seasonal variability of the topsoil microbial biomass and activity. **Catena**, 86:117-120, 2011.

Luchese EB, Favero LOB, Lenzi E. **Fundamentos da Química do Solo Teoria e Prática**. 2. ed. Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 2002. 159p.

Madeira MV, Fabião A, Pereira JS, Araújo MC, Ribeiro C. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. **Forest Ecology and Management**, v. 171, n. 1-2, p. 75–85, 2002.

Menezes AA. **Produtividade da cultura do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo** [tese]. Universidade Federal de Viçosa, 2005, 91p.

Neilsen GH, Parchomchuk P, Neilsen D, Zebarth BJ. Drip-fertigation of apple trees affects root distribution and development of K deficiency. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 80, n. 2, p. 353–361, 2000.

Nicoloso RS, Lovato T, Amado TJC, Bayer C, Lanzasova ME. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 2425–2433, 2008.

Nömmik H, Vathras K. Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils. In: Stevenson FJ. Nitrogen in Agricultural Soils. **ASA-SSSA**, 1982. p.123-171.

Portugal AF, Jucksch I, Schaefer CEGR, Wendling B. Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em argissolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 5, p. 2091–2100, 2008.

Potter CS, Klooster SA. Global model estimates of carbon and nitrogen storage in litter and soil pools: response to changes in vegetation quality and biomass allocation. **Tellus**, v. 49b, p. 1–17, 1997.

Pulrolnik K, Barros NF, Silva IR, Novais RF, Brandani CB. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e Cerrado no vale do Jequitinhonha - MG. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125–1136, 2009.

Rangel OJP, Silva CA, Guimarães PTG, Melo LCA, Oliveira Junior AC. Carbono orgânico e nitrogênio total do solo e suas relações com os espaçamentos de plantio de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 5, p. 2051–2059, 2008.

Rasse DP, Rumpel C, Dignac MF. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and Soil**, v. 269, n. 1-2, p. 341–356, 2005.

Reis GG, Reis MGF, Fontan ICI, Monte MA, Gomes NA, Oliveira CHR. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 921–931, 2006.

Reis MGF, Kimmins JP, Resende GC, Barros NF. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no Cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, 9:149-162, 1985.

Saggar S, Tate KR, Giltrap DL, Singh J. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide and methane in New Zealand terrestrial ecosystems and their mitigation options: A review. **Plant and Soil**, v. 309, n. 1-2, p. 25–42, 2008.

Sant'ana JAV, Coelho EF, Faria MA, Silva EL, Donato SLR. Distribuição de raízes de bananeira “prata-anã” no segundo ciclo de produção sob três sistemas de irrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, p. 124–133, 2012.

Santos GA, Silva LS, Canellas LP, Camargo FAO. **Fundamentos da matéria orgânica**

do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais. 2. ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654 p.

Shang C, Tiessen H. Organic matter lability in tropical Oxisol: Evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, and magnetic fractionations. **Soil Science**, 162:795-807, 1997.

Sitaula BK, Hansen S, Sitaula JIB, Bakken LR. Methane oxidation potentials and fluxes in agricultural soil: Effects of fertilisation and soil compaction. **Biogeochemistry**, v. 48, n. 3, p. 323–339, 2000.

Six J, Frey SD, Thiet RK, Batten KM. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 70:555-569, 2006.

Smith KA, Conen F. **Measurement of Trace Gases, I: Gas analysis, Chamber Methods, and Related Procedures.** In: Soil and Environmental Analysis: Modern Instrumental Techniques. 3 ed. New York, 2004. 576 p.

Sousa SGA. **Produção e decomposição de serrapilheira de uma floresta ombrófila mista aluvial, rio Barigui, Araucária, PR** [dissertação]. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003. 127 p.

Stape JL, Binkley D, Ryanc MG, Fonseca S, Loos RA, Takahashi EN, Silva CR, Silva SR, Hakamadaf RE, Ferreira JMA, Lima AMN, Gava JL, Leite FP, Andrade HB, Alves JM, Silva GGC, Azevedo MR. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010.

Stape JL, Binkley D, Ryan MG. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 17–31, 2004.

Turner J, Lambert MJ, Johnson DW. Experience with patterns of change in soil carbon resulting from forest plantation establishment in eastern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 220, p. 259–269, 2005.

Ussiri AN, Lal R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil Till. Res.**, 104:39-47. 2009.

Vergutz L, Novais RF, Silva IR, Barros NF, Nunes TN, Piau AAM. Mudanças na matéria orgânica do solo causadas pelo tempo de adoção de um sistema agrossilvopastoril com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 1, p. 43–57, 2010.

Zinn YL, Resck DVS, Silva JE. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 166, n. 1-3, p. 285–294, 2002.

Zinn YL, Lal R, Resck DVS. Texture and organic carbon relations described by a

profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 127, n. 1-2, p. 168–173, 2005.

Zinn YL, Lal R, Resck DVS. Eucalypt plantation effects on organic carbon and aggregation of three different-textured soils in Brazil. **Soil Research**, v. 49, n. 7, p. 614–624, 2011.

CONCLUSÕES GERAIS

O cultivo do eucalipto ao final do ciclo acumula mais C no solo, atua como dreno de CH₄ e de CO₂ atmosférico, quando são consideradas emissões líquidas desses GEE, e recupera a qualidade do solo, ao avaliar o perfil do solo como um todo, quando comparados ao Cerrado nativo.

O preparo do solo para plantio do eucalipto, por meio da subsolagem, proporciona maiores perdas de COS, na forma de CO₂, inclusive do C-CO₂ oriundo do COS das antigas pastagens que se encontrava protegido dentro dos agregados do solo.

O efluxo de C-CO₂ do solo varia positivamente com a temperatura ambiente e a temperatura e a umidade do solo.

A colheita do eucalipto com os métodos Feller + Skidder e Harvester + Forwarder, o preparo do solo e o manejo dos resíduos da colheita não afetam os influxos líquidos de CH₄ para o solo.

Os solos avaliados em três regiões produtoras de eucalipto no Brasil apresentaram baixas emissões de N₂O para a atmosfera mesmo sob condições ótimas de umidade e quando da aplicação de diferentes fertilizantes nitrogenados.

As raízes finas do eucalipto contribuem com 13 e 17 % do C- total do solo ao final de um ano, quando manejados sob reforma ou condução, respectivamente. No entanto, esse aporte de C via raízes/rizodepósitos causam efeito priming no carbono orgânico velho/nativo do solo.

O solo estabiliza uma parte significativa do C aportado pelas raízes finas do eucalipto, em especial quando este for manejado sob regime de talhadia. No entanto, somente o aporte de C ao solo via raízes finas do eucalipto, durante a fase inicial de crescimento, não é suficiente para manter os teores totais de C do solo. Assim, o aporte de C via ciclagem do litter e manutenção dos resíduos da colheita são importantes formas de sustentar a matéria orgânica e a produtividade do eucalipto nesses solos mais arenosos no longo prazo.