

MARCOS VINICIUS MANSANO SARTO

**CONTRIBUIÇÃO DO EUCALIPTO PARA A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM
SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

Botucatu

2018

MARCOS VINICIUS MANSANO SARTO

**CONTRIBUIÇÃO DO EUCALIPTO PARA A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM
SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP -
Campus de Botucatu, para obtenção
do título de Doutor em Agronomia
(Agricultura).

Orientador: **Ciro Antonio Rosolem**
Coorientador: **Wander Luis Barbosa
Borges**

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S251c Sarto, Marcos Vinicius Mansano, 1988-
Contribuição do eucalipto para a matéria orgânica do solo em sistema integrado de produção agropecuária / Marcos Vinicius Mansano Sarto. - Botucatu: [s.n.], 2018
98 p.: grafs. color., tabs.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018
Orientador: Ciro Antonio Rosolem
Coorientador: Wander Luis Barbosa Borges
Inclui bibliografia

1. Eucalipto. 2. Biomassa. 3. Agropecuária. 4. Enzimas extracelulares. 5. Sequestro de carbono. I. Rosolem, Ciro Antonio. II. Borges, Wander Luis Barbosa. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: CONTRIBUIÇÃO DO EUCALIPTO PARA A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

AUTOR: MARCOS VINICIUS MANSANO SARTO

ORIENTADOR: CIRO ANTONIO ROSOLEM

COORIENTADOR: WANDER LUÍS BARBOSA BORGES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CIRO ANTONIO ROSOLEM

Dep'to de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DO NASCIMENTO

Pós-doutorando - Dep Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

Prof. Dr. JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES

Deptº de Ciências Florestais / ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA

Prof. Dr. RAFAEL OTTO

Depto. Ciência do Solo / ESALQ - USP - Piracicaba/SP

Botucatu, 06 de março de 2018

Aos meus pais, Salvador e Janice Sarto, a minha irmã Marcella, e a família Wobeto por tudo que fizeram e ainda fazem por mim.

OFEREÇO

À Minha Esposa, Jaqueline, pela compreensão, apoio e amor incondicional.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem, pela excelente orientação e confiança durante todo o doutorado, e, sobretudo, pela amizade e exemplo.

Ao pesquisador Dr. Wander Luís Barbosa Borges, pela força de vontade, auxílio nas amostragens, amizade e orientação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal e do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Agricultura da UNESP.

À Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), por ter cedido a área experimental, e seus funcionários para auxílio nas coletas.

Ao Prof. Dr. Charles W. Rice, pela orientação durante o estágio de pesquisa na Kansas State University-USA.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento pessoal de Nível Superior) pela bolsa concedida. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de doutorado e financiamento das pesquisas Processos nº 2014/10656-3 e 2016/14323-4. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

Aos colegas e amigos da Pós-Graduação, Doglas Bassegio, Jéssyca Dellinhares Lopes Martins, Michely da Silva Alves, Carlos Pires, Johanie Zayas, Edwin Akely entre outros, pelo convívio, amizade e companheirismo. Aos demais amigos de Pós-Graduação, pelo companheirismo de sempre.

A todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a realização desse trabalho. Muito obrigado.

RESUMO

Os objetivos deste trabalho foram investigar a contribuição do sistema radicular de eucalipto e *U. brizantha*, no sequestro de carbono, e as propriedades microbiológicas do solo em sistema integrado de produção agropecuária. O sistema era composto por 2 eucaliptos, *E. grancam* e *E. urograndis*, integrados com a forrageira [*Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) R. Webster 'Marandu'] em região tropical. A inserção do eucalipto em área de pastagem reduz a produtividade de forragem até pelo menos 2 m de distância do eucalipto. A produtividade de forragem integrada aumenta ao longo do transecto de 1,7 Mg ha⁻¹ a 0 m para 4,45 Mg ha⁻¹ aos 6 m do eucalipto. A densidade de comprimento radicular é modificada mais na superfície do solo principalmente até 0,4 m, sendo que a inserção do eucalipto em área de pastagem reduz a densidade de comprimento, densidade e diâmetro radicular. As quantidades de raízes de eucalipto (C₃) são mais abundantes próximo das árvores, e são reduzidas com a distância do eucalipto até 1 m de profundidade. A quantidade total de raízes no solo é menor com a inserção do componente florestal em área de pastagem bem manejadas, de 11,6 Mg ha⁻¹ em sistema integrado de produção para 18,4 Mg ha⁻¹ na pastagem a pleno sol, correspondendo a redução de 36 % na quantidade de raízes no solo até 1 m de profundidade. Os estoques de C variaram de 62–65 Mg ha⁻¹ no sistema integrado de produção, não diferindo entre os eucaliptos, e nem quanto às distâncias do eucalipto, o sistema integrado de produção manteve os estoques de C próximo da condição inicial (66 Mg ha⁻¹). Os estoques de C foram maiores na pastagem que no sistema integrado de produção agropecuária apenas na camada de 0-0,20 m de profundidade. A análise isotópica do solo não revelou mudança nos valores $\delta^{13}\text{C}$ em função da inserção do eucalipto (C₃) no SIPA até 1 m. No sistema integrado há estratificação da umidade do solo, com menor umidade do solo próximo ao eucalipto. Apesar do aumento atividade enzimática no solo em sistema integrado, a inserção de eucaliptos na área de pastagem não afetou as propriedades microbianas do solo.

Palavras-chave: Biomassa microbiana. C₃. C₄. Competição. Distribuição radicular. Enzimas extracelulares. Sistema agroflorestal. Sequestro de carbono.

ABSTRACT

The objective of this work was to investigate the contributions of the eucalyptus and *U. brizantha* root system, carbon sequestration, and microbiological soil properties in an integrated crop-livestock system (ICLS). The system was composed of two eucalyptus, *E. grandis* and *E. urograndis*, integrated with a forage [*Urochloa brizantha* (Hochst. Ex A. Rich.) R. Webster 'Marandu'] in a tropical region. The insertion of eucalyptus in a pasture area reduces forage production up to 2 m away from the eucalyptus. An integrated forage yield increased along the transect from 1.7 Mg ha⁻¹ to 0 m to 4.45 Mg ha⁻¹ to 6 m of eucalyptus. The root length density was modified more in the soil surface, up to 0.4 m, than deep in the soil and the insertion of the eucalyptus in the pasture area reduced the density of length, overall density, and root diameter of the eucalyptus. The amounts of eucalyptus (C₃) roots are more abundant near the trees and most of these are within a depth of 1 m. The total amount of non-soil roots is lower with an insertion of the forest component in a well-managed pasture area, from 11.6 Mg ha⁻¹ in an integrated production system to 18.4 Mg ha⁻¹ in the pasture in full sun, corresponding to a 36% reduction in the amount of roots in the soil up to 1 m in depth. C stocks ranged from 62-65 Mg ha⁻¹ without an integrated production system, not differing between eucalyptus, nor even at the distances of eucalyptus, and the integrated production system maintained C stocks close to the initial condition (66 Mg ha⁻¹). C stocks were higher in the production of an integrated agricultural production system only in the layer 0-0.20 m deep. The soil isotopic analysis showed no change in $\delta^{13}\text{C}$ values as a function of the insertion of eucalyptus (C₃) in ICLS up to 1 m. In the integrated system there is stratification of the soil unit, with lower soil moisture near the eucalyptus. Despite increasing enzymatic activity, there is no soil in an integrated system, an insertion of eucalyptus in the area of unaffected passage as microbial property of the soil.

Keywords: Microbial biomass. C₃. C₄. Competition. Root distribution. Extracellular enzymes. Agroforestry system. Carbon sequestration.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 1 - Interação radicular em sistema integrado de produção agropecuária	20
Resumo.....	20
Abstract.....	21
1.1 Introdução	21
1.2 Material e Métodos.....	23
1.3 Resultados	29
1.4 Discussão.....	38
1.5 Conclusões.....	41
1.6 Agradecimentos	42
Referências	42
CAPÍTULO 2 - Contribuição do eucalipto integrado com <i>U. Brizantha</i> para a matéria orgânica do solo.....	47
Resumo.....	47
Abstract.....	47
2.1 Introdução	48
2.2 Material e Métodos.....	49
2.3 Resultados	54
2.4 Discussão.....	58
2.5 Conclusões.....	60
2.6 Agradecimentos	61
Referências	61
CAPÍTULO 3 - Atividade microbiológica do solo em sistema integrado de produção agropecuária	64
RESUMO.....	64
ABSTRACT	65
3.1 Introdução	65
3.2 Material e Métodos.....	67
3.3 Resultados	72
3.4 Discussão.....	82
3.5 Conclusões.....	86

Agradecimentos.....	87
Referências	87
CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
REFERÊNCIAS.....	95

INTRODUÇÃO GERAL

A integração lavoura pecuária floresta (ILPF), também conhecida como sistema agrossilvipastoril, integra atividades agrícolas, pecuárias e florestais, realizadas na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotação, e busca efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, contemplando a adequação ambiental, a valorização do homem e a viabilidade econômica da atividade agropecuária (BALBINO et al., 2012).

No sistema de ILPF as árvores podem influenciar a quantidade e a disponibilidade de nutrientes na zona de absorção radicular das culturas consorciadas, pois, o sistema radicular das árvores, por ser mais profundo, intercepta os nutrientes localizados em camadas do solo pouco acessíveis às raízes das culturas agrícolas ou forrageiras e os disponibiliza na superfície do solo (DIEL et al., 2014). A deposição de biomassa das árvores e das gramíneas na superfície do solo maximiza a ciclagem de nutrientes. Além disso, a disponibilidade de grande quantidade de resíduos orgânicos, em constante renovação pelas árvores e pela pastagem, aumenta os teores de carbono e melhora as condições de aeração, de infiltração de água e de estruturação do solo (DIEL et al., 2014; FREITAS et al., 2013). O que define esses sistemas é a relação entre seus componentes, que deve ser manejada para tirar proveito das interações que se estabelecem: mutualismo ou cooperação (interação entre duas espécies que se beneficiam reciprocamente), comensalismo (designa relações em que uma espécie se beneficia de recursos da outra sem prejudicá-la), competição e predação (JOSE et al., 2004; PORFÍRIO-DA-SILVA, 2007).

A adoção dos sistemas integrados contribui para viabilizar o sistema plantio direto, com a palha produzida pela pastagem tropical bem manejada. Além disso, a pastagem proporciona à lavoura um solo melhor estruturado, em função do sistema radicular abundante e do resíduo de material orgânico deixado na superfície e em subsuperfície do solo (LOSS et al., 2011; SILVA et al., 2011). A inclusão do componente arbóreo aos componentes lavoura e pastagem representa avanço inovador. Os efeitos sinérgicos entre os componentes incluem a adequação ambiental e a viabilidade econômica da atividade agropecuária. Pode-se utilizar a ILPF para implantar um sistema agrícola sustentável, com base nos princípios da rotação de culturas e do consórcio entre culturas de grãos,

forrageiras e espécies arbóreas, para produzir, na mesma área, grãos, carne ou leite e produtos madeireiros e não madeireiros ao longo de todo ano (BALBINO et al., 2011). Além de proporcionar microclima favorável, aumentando os índices de conforto térmico para os animais à sombra das árvores, ao contrário da exposição à insolação direta (GARCIA et al., 2011; SILVA et al., 2011).

A ILPF possui um grande potencial em estocar C acima e abaixo do solo devido à grande quantidade de materiais orgânicos que são adicionados em superfície e em profundidade (MONTAGNINI; NAIR, 2004; OELBERMANN; VORONEY, 2007). A estimativa do potencial em escala global de sistemas agroflorestais em sequestrar C é de 1,1 a 2,2 Pg durante 50 anos, na parte aérea e no solo (DIXON, 1995). Entretanto, esse potencial varia de acordo com o modelo, composição das espécies, idade das espécies componentes, localização geográfica, fatores ambientais e práticas de manejo (JOSE, 2009). A importância dos sistemas integrados com relação ao sequestro de C está sendo amplamente reconhecido, mas ainda há escassez de dados quantitativos sobre o estoque de carbono no solo em regiões tropicais. Além disso, a inserção do eucalipto nas áreas de pastagens pode modificar a quantidade e distribuição do aporte de matéria orgânica do solo.

As florestas tropicais desempenham um importante papel no ciclo global de carbono por representarem cerca de 20% dos estoques globais de carbono e 30% da produtividade terrestre (PRENTICE et al., 2001). Uma grande porção do carbono no solo é proveniente das raízes finas, que é um componente essencial dos ecossistemas terrestres. Essas raízes, com diâmetro ≤ 2 mm, com diversas ramificações e associações com hifas de fungos micorrízicos, são de grande importância na absorção de água e nutrientes (MAJDI et al., 2005; McCORMACK et al., 2015).

A dinâmica de raízes finas no solo tem o potencial de influenciar a produção e emissão de gases. As raízes vivas produzem CO₂ durante a respiração e ambas, vivas e mortas, contribuem com C e N lábeis para a produção microbiana de CO₂, N₂O, NO e CH₄ (SILVER et al., 2005). Assim, a dinâmica é um componente particularmente importante no ciclo de carbono global, influenciando a atividade microbiana do solo e a decomposição da matéria orgânica.

O sucesso ou insucesso do manejo de povoamentos integrados tem como principais motivos: o arranjo e o modelo de associação entre as espécies (KAYE

et al., 2000); a existência de alelopátia (SHIBU et al., 2006); a composição, a quantidade e a velocidade de decomposição da serapilheira das espécies fixadoras de N_2 (ANDRADE et al., 2000); condições edafoclimáticas (ANDRADE et al., 2000); a fertilidade inicial do solo e a ciclagem biogeoquímica (ANDRADE et al., 2000) e a acidez do solo (KAYE et al., 2000; GALIANA et al., 2002; MARTIN et al., 2003).

A eficiência e a capacidade de exploração do solo são determinadas pela área superficial das raízes finas, distribuição das raízes dentro do perfil do solo, comprimento específico de raiz, arquitetura radicular, plasticidade das raízes, velocidade de absorver água e nutrientes. Esses processos acontecem no solo e regulam a facilitação e a competição entre as espécies em povoamentos mistos (BAUHUS et al., 2000; SHIBU et al., 2006). A estratificação do sistema radicular é importante para a coexistência de diferentes espécies na mesma área, principalmente quando os recursos forem limitantes (FORRESTER et al., 2006).

A importância dos sistemas integrados com relação ao sequestro de C está sendo amplamente reconhecido, entretanto a compreensão das interações ecológicas no solo em sistemas integrados de produção ainda é limitada. Compreender quando e como ocorre a competição entre as raízes finas das espécies por recursos, bem como sua relação com o desenvolvimento aéreo e a importância ecológica das interações, necessitam de um amplo conhecimento biológico (CASPER; JACKSON, 1997). Dados quantitativos da contribuição do sistema radicular das espécies nos sistemas integrados de produção agropecuária, ajudam a compreender quando e como ocorre a competição entre as raízes finas das espécies por recursos, bem como sua relação com o desenvolvimento aéreo.

Indicadores químicos, físicos e biológicos podem ser usados como indicadores de qualidade do solo. Dentre os atributos biológicos que podem ser utilizados como bioindicadores de qualidade é possível destacar o carbono da biomassa microbiana, a respiração medida por meio do carbono prontamente mineralizável, o CO_2 evoluído a partir de amostras incubadas sem fumigação, índices derivados como o quociente metabólico e quociente microbiano, atividade de enzimas do solo relacionadas aos ciclos do C, P e S (β -glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase, respectivamente), a biodiversidade de espécies microbianas e a diversidade funcional (MENDES et al., 2009). Assim, tem-se considerado a

biomassa microbiana como um índice útil para determinar a contribuição da matéria orgânica do solo para estabilidade dos agregados e qualidade do solo (GUPTA; GERMIDA, 1988; HAYNES; SWIFT, 1990).

Os componentes microbianos vivos do solo são também denominados de biomassa microbiana, em que bactérias e fungos respondem por cerca de 90% da atividade microbiana do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). A biomassa microbiana do solo é uma indicadora sensível das mudanças no solo (MERCANTE et al., 2008) por ser a principal responsável pela transformação da matéria orgânica, pela ciclagem de nutrientes e pelo fluxo de energia no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), e por ser facilmente alterada por mudanças no uso e manejo do solo. No entanto, dentro de certos limites, os micro-organismos conseguem retomar o estado inicial da comunidade microbiana por apresentar características vitais como, rápida multiplicação e atividade metabólica e bioquímica (SIX et al., 2004; SIX et al., 2006).

A microbiota é indispensável para o funcionamento do solo, na mineralização e síntese da matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes, e na formação de agregados do solo (KAMAA et al., 2011). Vários estudos ressaltam a importância de fungos micorrízicos e bactérias como determinantes chaves na diversidade, funcionamento e sustentabilidade do ecossistema (SINGH et al., 2009; QUECINE et al., 2012). Docherty; Gutknecht (2012) ressaltam a relevância de compreender por meio de diferentes análises da comunidade microbiana do solo, como mudanças ocasionadas ao ambiente por meio de mudanças no uso da terra tem alterado o nosso planeta e suas consequências, além de apontarem a possibilidade de prever mudanças nos ecossistemas, já que a ciclagem de nutrientes nos ciclos biogeoquímicos é catalisada pelos micro-organismos do solo.

Atributos biológicos do solo são essenciais na compreensão e determinação da resposta de um ambiente sob determinado manejo ou estratégia de uso do solo, assim resultando nas melhores estratégias de manejo do solo (SPACCINI et al., 2001). Rousseau et al. (2012) correlacionaram atributos abióticos com indicadores biológicos e observaram que os sistemas agroflorestais apresentaram qualidade do solo semelhante à de florestas, consideradas como áreas referências por manterem o funcionamento estável das propriedades físicas, químicas e biológicas pela não dependência de insumos externos, garantindo assim a sustentabilidade do ecossistema. Os autores correlacionaram

a macrofauna com quatro atributos abióticos (densidade do solo, soma de bases, pH e carbono) e observaram a relação da maior abundância de predadores com o fluxo adequado de energia e com a maior qualidade do solo, evidenciando a capacidade de indicadores biológicos em mensurar a qualidade do solo.

Desta forma a inserção de árvore de eucalipto em área de pastagem pode modificar a quantidade e qualidade da matéria orgânica no solo, refletindo na dinâmica do C, e na atividade microbiana do solo. Estudos do sistema radicular das espécies consorciadas, da dinâmica da matéria orgânica e da saúde do solo em sistemas integrados de produção agropecuária tropical são escassos. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar se a inserção do eucalipto em área de pastagem pode modificar a produção de biomassa acima e abaixo do solo, o estoque de C no solo, fornecendo informações sobre o sequestro de C no solo, além da atividade microbiológica do solo no sistema integrado de produção agropecuária.

CAPÍTULO 1

Interação radicular em sistema integrado de produção agropecuária

Resumo

O objetivo deste estudo foi investigar a contribuição do sistema radicular de árvores de eucalipto integrado com a forrageira *U. brizantha* em região tropical. Foram amostradas raízes finas ($\leq 3\text{mm}$) à 0, 2, 4 e 6 m do eucalipto, e em uma pastagem à pleno sol como controle. A inserção do eucalipto em área de pastagem reduz a produtividade de forragem à medida que se aproxima do eucalipto. A produção de forragem a pleno sol é superior ao sistema integrado pelo menos até 2 m de distância do eucalipto. A produtividade de forragem integrada aumenta ao longo do transecto de $1,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ a 0 m para $4,45 \text{ Mg ha}^{-1}$ aos 6 m do eucalipto. A densidade de comprimento radicular é modificada mais na superfície do solo principalmente até 0,4 m, sendo que a inserção do eucalipto em área de pastagem reduz a densidade de comprimento, densidade e diâmetro radicular. As quantidades de raízes de eucalipto (C_3) são mais abundantes próximo das árvores, e são reduzidas com a distância do eucalipto em todas as profundidades até 1 m. A quantidade total de raízes no solo é menor com a inserção do componente florestal em área de pastagem bem manejadas, de $11,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ em sistema integrado de produção para $18,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ na pastagem a pleno sol, correspondendo a redução de 36 % na quantidade de raízes no solo até 1 m de profundidade. Não houve estratificação de exploração das camadas do solo pelo sistema radicular das espécies. O *E. grandis* apresentou exploração radicular em todas as camadas do solo, fazendo com que o desenvolvimento radicular da *U. brizantha* fosse prejudicado em sistema integrado. O elevado grau de competição no desenvolvimento radicular das espécies resultou, aos 6 anos, na camada 0,0-0,20 m, em redução de 30 % na densidade de raízes finas (drf) entre as espécies.

Palavras-chave: Competição, distribuição radicular, sistema agroflorestal, sequestro de carbono

Root interaction in tropical integrated crop–livestock system

Abstract

The objective of this study was to investigate the contribution of the root system of eucalyptus trees integrated with the *U. brizantha* forage in a tropical region. Fine roots (≤ 3 mm) were sampled at 0, 2, 4 and 6 m of eucalyptus and in pasture in the full sun as a control. The insertion of eucalyptus in pasture area reduces the forage yield as it approaches the eucalyptus. Forage production in full sun is higher than the integrated system at least up to 2 m away from eucalyptus. Integrated forage yield increases along the transect from 1.7 Mg ha⁻¹ to 0 m to 4.45 Mg ha⁻¹ at 6 m from Eucalyptus. The root length density is modified more in the soil surface mainly up to 0.4 m, and the insertion of the eucalyptus in pasture area reduces the density of length, density and root diameter. The quantities of eucalyptus (C₃) roots are more abundant near the trees, and are reduced with eucalyptus distance at all depths up to 1 m. The total amount of roots in the soil is lower with the insertion of the forest component in a well-managed pasture area, from 11.6 Mg ha⁻¹ in an integrated production system to 18.4 Mg ha⁻¹ in the pasture in full sun, corresponding the reduction of 36% in the amount of roots in the soil up to 1 m depth. There was no stratification of the exploitation of the soil layers by the root system of the species. The *E. grandis* presented root exploration in all layers of the soil, causing the root development of *U. brizantha* to be harmed in an integrated system. The high degree of competition in the root development of the species resulted, at 6 years, in 30 % reduction in the density of fine roots (drf) between species.

Keywords: Competition, root distribution, agroforestry system, carbon sequestration

1.1 Introdução

O sequestro de carbono (C) atmosférico e armazenamento na biosfera terrestre, é uma das opções que tem sido propostas para mitigar a emissão de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que o solo é o maior reservatório de C no ambiente. Desta forma, os sistemas integrados de produção têm recebido reconhecimento não só pela sustentabilidade agrícola, mas também pelas questões relacionadas às mudanças climáticas no planeta (Albrecht & Kandji, 2003), uma vez que os sistemas agroflorestais tendem a sequestrar

maiores quantidades de carbono que os sistemas agrícolas sem árvores (Neufeldt et al., 2009). Devido às grandes quantidades de C na matéria orgânica nos solos do mundo, é muito importante compreender como conservar ou, se possível, aumentar as reservas de C do solo (Powlson et al., 2014).

Nos sistemas integrados a combinação de atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais na mesma área, pode aumentar a fertilidade e o teor de matéria orgânica no solo (Castro et al., 2013). O uso de gramíneas, especialmente de braquiárias, tem sido essencial para a viabilidade dos sistemas de produção e sustentabilidade da agropecuária em solos arenosos, favorecendo a produção de biomassa e maiores taxas de lotação em pastagens (Carvalho et al., 2014). De fato, tanto os agricultores como a sociedade como um todo podem se beneficiar com os sistemas integrados, uma vez que a manutenção da fertilidade do solo é crítica para a conservação dos recursos naturais e para a prestação de serviços ambientais (Lemaire et al., 2014; Salton et al., 2014). No entanto, o potencial dos sistemas agroflorestais no sequestro C varia em função da espécie, idade das árvores, localização geográfica, fatores locais e regime climático (Kittur et al., 2016).

É importante o conhecimento sobre o desenvolvimento de raízes finas em sistemas integrados, uma vez que pouco se conhece sobre interação radicular nestes sistemas. Melhor conhecimento das interações dos sistemas radiculares é importante no entendimento das interações no acúmulo de carbono, no crescimento e produtividade das espécies, no planejamento e aplicação de fertilizantes e para o controle da competição (Bauhus et al., 2000). A baixa capacidade de planejar povoamentos integrados de sucesso, com interações positivas entre as espécies, deve-se ao limitado conhecimento sobre as interações competitivas e complementares que ocorrem no solo (Shibu et al., 2006).

É possível a determinação da proporção de raízes de espécies de vias fotossintéticas C₃ e C₄ através da discriminação isotópica natural do isótopo estável ¹³C (Rosolem et al., 2012). Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ de plantas C₃ normalmente variam de -30 ‰ a -22 ‰, enquanto os valores de plantas C₄ variam de -15 ‰ a -9 ‰ (O'Leary, 1995). Em seguida, é possível calcular a proporção de carbono derivado de plantas C₃ e C₄, através de equação de mistura de massas (Balesdent & Mariotti, 1996; Yoneyama et al., 2001).

A importância dos sistemas integrados com relação ao sequestro de C está sendo amplamente reconhecido, entretanto a compreensão das interações no solo ainda é bastante limitada. As árvores podem competir com as culturas associadas através dos seus sistemas radiculares, reduzindo a produção e contribuindo para o fracasso do sistema de uso da terra (Schroth et al., 1995). Dados quantitativos sobre a contribuição do sistema radicular das

espécies no sistema, ajudam a compreender quando e como ocorre a competição entre as raízes finas das espécies por recursos, bem como sua relação com o desenvolvimento aéreo. Nossa hipótese foi que a inserção do eucalipto em áreas de pastagem pode modificar a quantidade e distribuição do sistema radicular das espécies em profundidade, além de afetar o crescimento das plantas forrageiras.

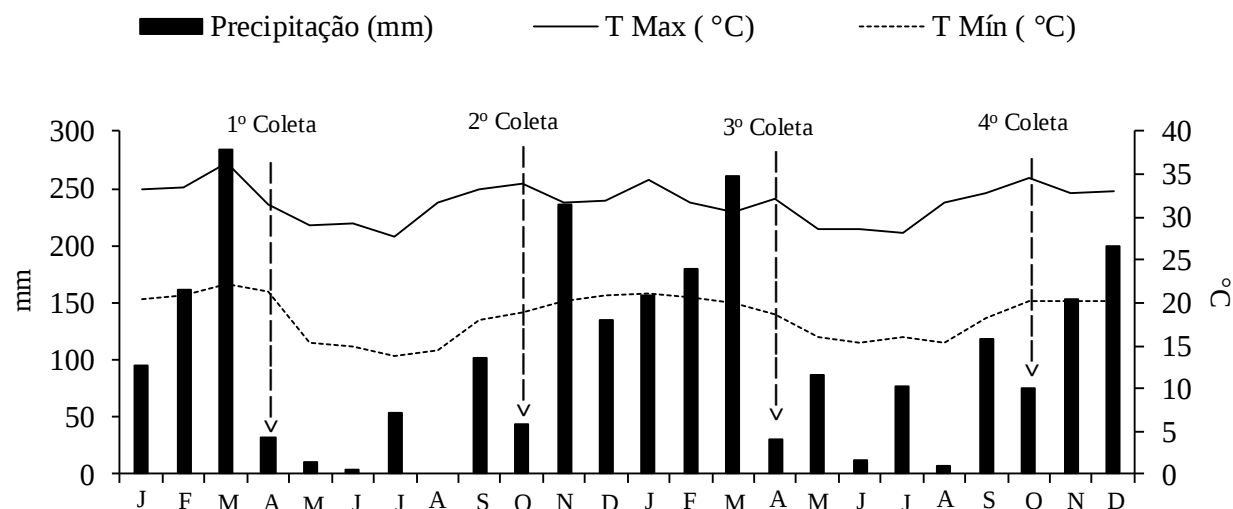
Os objetivos do presente trabalho foram (I) quantificar o aporte de carbono na biomassa acima e abaixo do solo; (II) discriminar a contribuição de raízes de eucalipto (C_3) e *U. brizantha* (C_4) no solo pela composição isotópica das raízes; (III) e determinar a densidade de comprimento radicular, densidade e diâmetro radicular em sistema integrado de produção agropecuária.

1.2 Material e Métodos

Caracterização da área experimental

As avaliações foram realizadas em um sistema integrado de produção agropecuária, instalado em área degradada de pastagem em 2009, no Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Seringueira e Sistemas Agroflorestais, do Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, localizado no município de Votuporanga-SP, Brasil. Nas coordenadas geográficas 20° 28' de Latitude Sul e 50° 04' de Longitude Oeste, apresentando relevo suave-ondulado e altitude de 410 a 490 m, com área de 6 ha, ocupado com pastagem nos últimos dez anos. De acordo com Köppen, o clima é do tipo Cwa, tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso (Alvares et al., 2013), com temperatura média anual de 24 °C, tendo a média das máximas de 30 °C e a média das mínimas de 18 °C, e precipitação pluviométrica média anual de 1100–1500 mm, os dados meteorológicos são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Precipitação, temperatura máxima e mínima da área experimental em 2014 e 2015



Segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (Embrapa 2013), o solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico ou Arenic Hapludult (Soil Survey Staff, 2014), de textura arenosa, os atributos químicos foram analisados segundo Raij & Quaggio (1983) e físicos de acordo com Embrapa (1997), são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas e físicas do solo Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico

Profundidade	P (Resina)	MOS	pH _{CaCl} ₂	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Al ³⁺	V
m	mg dm ⁻³	g kg ⁻¹				mmol _c dm ⁻³			%
0-0,05	2,89	14,2	4,9	1,57	19,4	13,7	24	0,36	55
0,05-0,10	0,78	12,9	4,7	1,32	7,0	4,1	31	1,12	29
0,10-0,20	0,33	11,5	4,9	1,04	6,2	3,1	32	1,39	25
0,20-0,40	0,35	10,4	4,7	0,71	7,5	3,3	31	1,28	27
0,40-0,60	0,30	9,8	5,1	0,88	8,0	3,3	22	2,47	35
0,60-0,80	0,44	9,8	5,2	0,80	8,2	3,5	21	1,69	26
0,80-1,00	0,44	7,2	5,3	0,57	9,1	3,8	19	1,40	41
Profundidade	Areia	Silte	Argila	Ds	Textura				
		g kg ⁻¹		Mg m ⁻³					
0-0,05	816	102	82	1,58	Arenosa				
0,05-0,10	820	73	107	1,60	Arenosa				
0,10-0,20	809	68	123	1,60	Arenosa				
0,20-0,40	783	75	142	1,60	Arenosa				
0,40-0,60	776	69	155	1,55	Média				
0,60-0,80	746	62	192	1,53	Média				
0,80-1,00	728	64	208	1,47	Média				

Histórico da área

O experimento foi instalado em uma área com pastagem degradada, com dez anos de implantação, de aproximadamente seis hectares, no inverno de 2009. Inicialmente a área foi preparada de forma convencional, através de arações e gradagens, e aplicação de 2000 kg ha⁻¹ de calcário. Após preparo, foi realizada a semeadura do milheto (*Pennisetum glaucum*) em setembro de 2009. Em outubro de 2009, foi realizada uma fosfatagem a lanço e após a fosfatagem foi realizado o sulcamento para o plantio do eucalipto, em linha simples sobre os terraços, no espaçamento de 2 × 12 m, utilizando mudas de 3 meses de idade, plantadas no sentido leste-oeste seguindo as curvas de nível, e na densidade de 370 plantas ha⁻¹. Utilizou-se dois eucaliptos: *E. grancam* 1277 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*) e *E. urograndis* H-13 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), cada parcela era composta por duas linhas do mesmo eucalipto. No verão, safra 2009/10, foi semeado soja em sistema plantio direto, e *C. juncea* na safrinha. No verão, safra 2010/11 semeou-se milho em consórcio com *U. brizantha* cv. Marandu, após a colheita do milho a forrageira se estabeleceu na área dando início ao SIPA. Aos dois anos de idade do eucalipto,

foi realizado desbaste até 12 m de altura, desbastando-se 2/3 da copa, a fim de proporcionar maior luminosidade a pastagem. Anualmente, era feita adubação nitrogenada na pastagem a lanço, na dose de 200 kg ha⁻¹ de N (ureia), no início do período de maior precipitação (outubro). Em setembro de 2011, foram introduzidos bovinos de corte (mestiços), com 28 meses recém-desmamados, em sistema de pastejo contínuo, com lotação de 2 UA ha⁻¹, mantidos até o momento do abate.

Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 4, com três repetições. Os tratamentos foram dois eucaliptos: *E. urograndis* H-13 (*Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*) e o *E. grancam* 1277 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), e quatro pontos de amostragens: 0 (linha de plantio), 2, 4 e 6 m das árvores de eucalipto nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,0 m de profundidade. As parcelas tinham aproximadamente 1,0 ha. Cada profundidade foi analisada separadamente, mas constaram de sub parcelas no tempo de amostragem. Além disso, utilizou-se uma pastagem a pleno sol como referência.

Avaliações

Umidade no solo

A umidade volumétrica do solo foi analisada por uma sonda de capacitância (modelo Diviner 2000®, Sentek Pty Ltd, Austrália), após o período chuvoso (abril 2014) e após o período seco (outubro 2014).

Massa de matéria seca da forragem

A produção de forragem foi avaliada pelo corte da forragem dentro de um quadrado de 0,5 × 0,5 m (0,25 m²), lançado aleatoriamente em diferentes pontos da área útil das parcelas, no final (abril) e início (outubro) do período chuvoso de 2014 e 2015. Após o corte, o mesmo foi colocado em sacos de papel e pesado, obtendo-se o valor de matéria verde da forragem. Desse material retirou-se uma sub amostra de aproximadamente 500 g, a qual foi seca em estufa a 60 °C/72 horas, pesadas, obtendo-se assim a massa de matéria seca.

Crescimento do eucalipto

Árvores de eucalipto foram avaliadas pelo diâmetro à altura do peito (DAP), a 1,30 m acima do nível do solo, de dez plantas de cada eucalipto, com o auxílio de fita métrica de diâmetro. Calculou-se o DAP por árvore, dividindo-se os valores de circunferência por π , obtendo-se o DAP, em centímetros, em outubro de 2015. A altura das árvores de eucalipto foi determinada em dez plantas por parcela, com auxílio de uma trena e um clinômetro Eletrônico Haglof.

A estimativa da biomassa total do eucalipto (m^3) foi obtida multiplicando-se o volume de madeira do caule pela densidade específica da madeira do eucalipto, esse número foi então multiplicado por 1,6 para obter uma estimativa da biomassa de toda a árvore (Dixon et al. 1993). O acúmulo de C nas árvores foi assumido como 50 % de sua biomassa total (Gifford, 2000).

Densidade de comprimento, densidade e diâmetro radicular

As raízes finas foram amostradas no final (abril) e início (outubro) do período chuvoso de 2014 e 2015, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m de profundidade. Em dois pontos por parcela, utilizando-se um cilindro de aço com 1,4 m de altura, e diâmetro interno de 60 mm. Após a coleta, as amostras de solo e raízes foram acondicionadas em sacos plásticos vedados e congeladas a -18°C . As amostras de raízes foram lavadas sobre peneiras de 0,5 mm, para separação do solo. Separou-se as raízes finas vivas das raízes mortas e das impurezas utilizando-se pinça e bandeja branca, raízes mortas foram facilmente diferenciadas das vivas pela cor mais escura e menor turgescência. O comprimento radicular e diâmetro médio radicular foram obtidos por digitalização das imagens em scanner de leitura ótica, na resolução de 300 dpi, com o programa WinRhizo versão 3.8-b (Régent Instruments Inc., Québec, Canadá), por sistema de análise de imagem, baseados no método de Tennant (1975). A densidade de comprimento radicular (cm cm^{-3}) foi obtida pela razão do comprimento radicular (cm) pelo volume (cm^3) de solo coletado, a densidade radicular (g dm^{-3}) pela razão da massa de matéria seca radicular (g) pela massa de solo (dm^3). Em seguida as amostras de raízes foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada de ar a $60-70^\circ\text{C}$ por 48 h, a massa de matéria seca radicular foi obtida através da pesagem em balança analítica (precisão de 0,0001g), para o cálculo em Mg ha^{-1} .

Distinção das raízes C₃ e C₄

A razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ das raízes foi analisada, afim de determinar a porcentagem de raízes do eucalipto e *U. brizantha* no solo. Amostras de raízes foram moídas em moinho criogênico à base de nitrogênio líquido (Spex - Modelo 6700), pesadas (50-70 μg) em cápsulas de estanho de 6 mm de altura e 4 mm de diâmetro (Modelo D1106-Elementar Microanalysis Limited), em seguida, colocadas no analisador elementar (Carlo Erba EA 1108 - Fisons, Milão - Itália), para análise do $\delta^{13}\text{C}$ em espectrômetro de massa de razão isotópica - IRMS (Finnigan MAT Delta Plus). A razão isotópica do C foi calculada pela relação entre o $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ das amostras em relação ao padrão internacional Vienna Pee Dee Belemnite, V-PDB.

As plantas de ciclo C₃ e C₄ possuem valores distintos de $\delta^{13}\text{C}$, que não se sobrepõem (Boutton, 1996). Assim, quando existem somente duas fontes isotopicamente distintas, o valor de $\delta^{13}\text{C}$ do produto refletirá a quantidade das duas fontes presentes no produto. Que pode ser quantificado pela equação de diluição isotópica a seguir:

$$\% \text{ C}_3 = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{amostra}} - \delta^{13}\text{C}_4}{\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_4}$$

Onde $\delta^{13}\text{C}_3$, $\delta^{13}\text{C}_4$ e $\delta^{13}\text{C}$ amostra são as composições isotópicas de raízes das plantas C₃, C₄ e da mistura de duas fontes, respectivamente.

Análise estatística

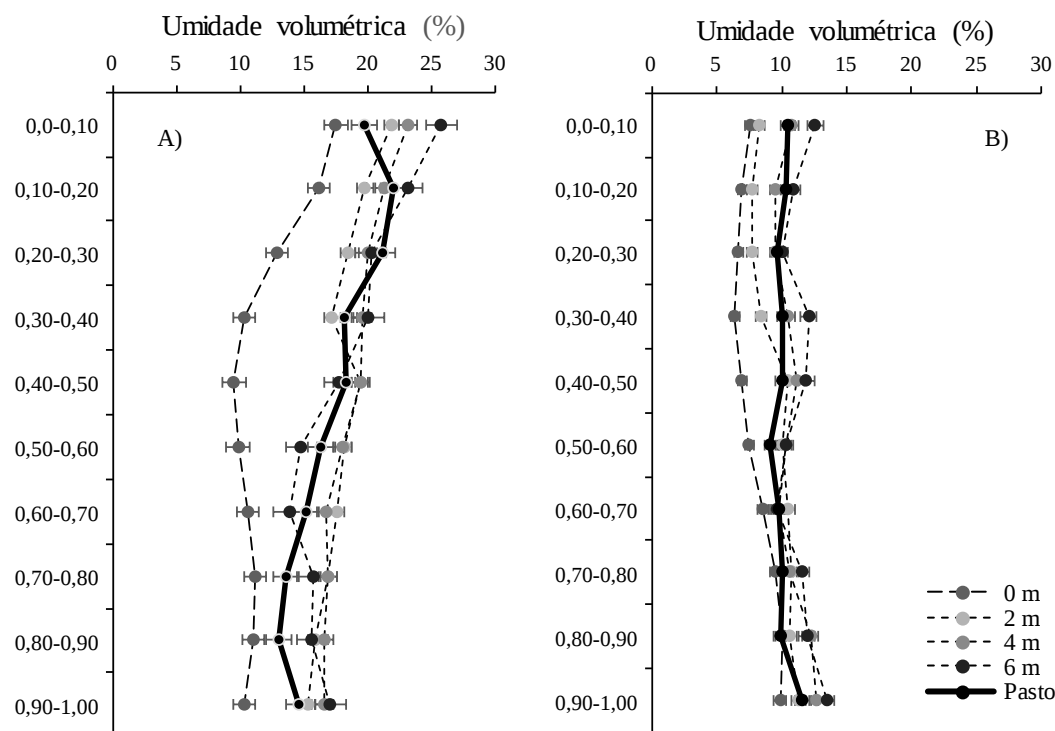
Os resultados obtidos foram verificados quanto às pré-suposições da análise de variância (normalidade e independência dos resíduos; homogeneidade da variância). Atendidos esses requisitos, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F 5 % ($p < 0,05$), os resultados foram analisados no programa estatístico Sisvar® (Ferreira, 2011). Quando verificadas diferenças, as médias foram comparadas pelo teste t (LSD) a 5 % de probabilidade.

1.2 Resultados

A umidade volumétrica do solo foi avaliada a fim de caracterização da área experimental (Figura 2). Observou-se menor umidade volumétrica do solo quanto mais próximo das árvores de eucalipto, com os menores valores à 0 m do eucalipto, e aumento da umidade volumétrica do solo com maiores distâncias as árvores de eucalipto tanto após período chuvoso (abril de 2014), quanto depois período seco (outubro de 2014) (Figura 2).

Houve variação na umidade volumétrica do solo em função do mês amostrado. Em abril de 2014, após período chuvoso, os valores de umidade volumétrica do solo foram maiores, variando de 10–25,7 %, em virtude da alta precipitação ocorrida no mês de setembro 101,9 mm e outubro 44 mm (Figura 1). Em outubro de 2014, os valores de umidade volumétrica do solo forem menores em relação aos de abril, devido à menor precipitação ocorrida nos meses anteriores, precipitação mensal de 44 mm em outubro (Figura 1), levando a valores de umidade volumétrica no solo de 9,97 %, com pouca diferença entre as profundidades do solo.

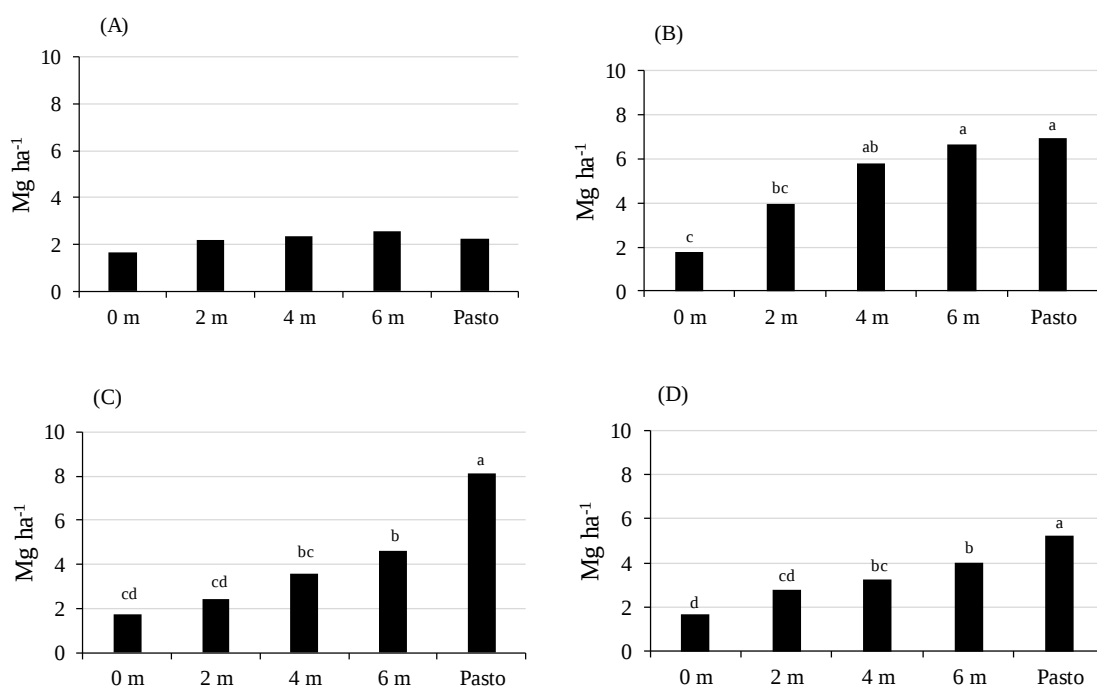
Figura 2 - Umidade volumétrica do solo no sistema integrado de produção e em pasto a pleno sol, após o período chuvoso: abril de 2014 (A) e após o período seco: outubro de 2014 (B)



Não houve diferença entre os eucaliptos na produtividade da forrageira em nenhuma das épocas estudadas, desta forma apresentamos as médias dos dois eucaliptos (Figura 3). A produção de matéria seca de forragem, em abril de 2014, não foi afetada pelas distâncias do eucalipto, além disso o sistema integrado não diferiu do pasto a pleno sol (Figura 3A). No início do período chuvoso, outubro de 2014, a forrageira foi afetada pela inserção do eucalipto, com menores valores próximo às árvores até 2 m de distância do eucalipto (Figura 3B). Neste caso, como um reflexo do período de estiagem anterior, a maior exigência hídrica próximo do eucalipto (Figura 2B), resultou em menor crescimento da forrageira no sistema integrado de produção.

Em abril de 2015, final do período chuvoso, a produção de forragem foi maior que em abril de 2014. Além disso, produção foi menor no sistema integrado de produção ($3,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) em relação a pastagem a pleno sol ($8,1 \text{ Mg ha}^{-1}$), principalmente devido à baixa precipitação no mês de abril (30 mm), também variou em função da distância do eucalipto (Figura 3C). Em outubro de 2015, a produção de forragem também foi influenciada pela distância do eucalipto, e maior produção no pasto a pleno sol (Figura 3D).

Figura 3 - Produção de massa de matéria seca da forragem, em abril (A) e outubro (B) de 2014, e abril (C) e outubro (D) de 2015 em sistema integrado de produção e pasto a pleno sol (n=6). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade



Os eucaliptos tiveram crescimento bastante semelhantes, não diferindo quanto as variáveis de crescimento e produção (Tabela 2). Em outubro de 2015 (82 meses), os eucaliptos apresentaram em média DAP de 0,2251 m, altura de 29,4 m, biomassa de 0,5617 m³ e produtividade de 41,56 Mg ha⁻¹.

Tabela 2 - Diâmetro à altura do peito (DAP), altura, biomassa, produtividade (PD) e carbono (C) dos eucaliptos, 6 anos após implantação (n=10)

Eucaliptos	DAP (m)	Altura (m)	Biomassa (m ³)	PD (Mg ha ⁻¹)	C Mg ha ⁻¹
		24/10/2015			
<i>E. urograndis</i>	0,2243 a	27,83 a	0,5278 a	39,06 a	19,53 a
<i>E. grancam</i>	0,2259 a	30,96 a	0,5956 a	44,07 a	22,03 a

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade

Não foram, geralmente, observadas diferenças significativas da densidade de comprimento radicular (DRL), densidade de raízes finas (DRF) e diâmetro de radicular (DR) em função do eucalipto no SIPA, aos 64 e 70 meses (abril e outubro de 2014), e 76 e 82 meses (abril e outubro de 2015), até 1,0 m de profundidade (Figuras 4, 5 e 6). Como seria esperado a densidade radicular diminuiu mais até 0,40 m de profundidade, com menores incrementos a cada camada até 1,0 m.

No entanto, a pastagem à pleno sol apresentou maior DRL principalmente nas camadas superficiais do solo (Figura 4), como nas profundidades de 0-0,05 m em abril de 2014, de 0,0-0,20 m em outubro de 2014, 0,0-0,10 m em abril de 2015 e 0,05-0,20 m em outubro de 2015 em relação ao sistema integrado de produção. Na camada de 0,0-0,20 m foram encontrados 67,81% do comprimento total das raízes analisadas (< 3mm). Da mesma forma, a DRF foi maior na área de pastagem a pleno sol em relação ao sistema integrado (Figura 5), nas profundidades de 0-0,05 m em abril de 2014, de 0,0-0,20 m em outubro de 2014, 0,0-0,20 m em abril de 2015.

Maior DR também foi obtido em área de pastagem à pleno sol em relação ao sistema integrado (Figura 6). Em abril de 2014 observou-se maior DR em profundidade de 0,20-1,0 m devido à baixa disponibilidade hídrica neste período, houve aumento do DR em profundidade no solo (Figura 6a). Em outubro de 2014 e abril de 2015, maior DR foi obtida na área de pastagem a pleno sol nas camadas de 0,0-0,40 m, e nas camadas de 0,05-0,20 m em outubro de 2015.

Figura 4 - Densidade do comprimento radicular em sistema integrado de produção e pasto a pleno sol, abril (A) e outubro (B) de 2014, abril (C) e outubro (D) de 2015 (n = 6)

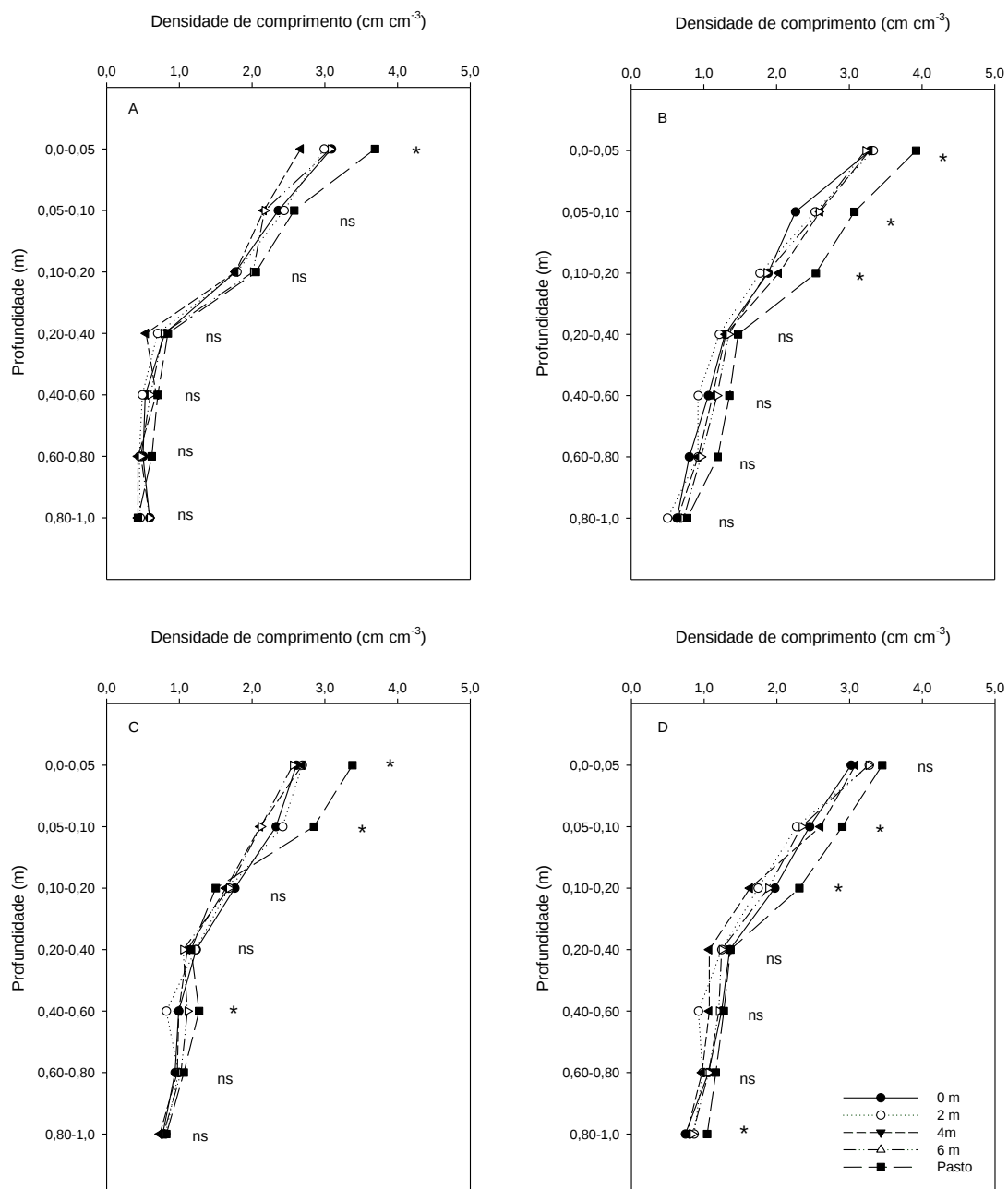


Figura 5 - Densidade radicular em sistema integrado de produção e pasto a pleno sol, abril (A) e outubro (B) de 2014, abril (C) e outubro (D) de 2015 (n = 6)

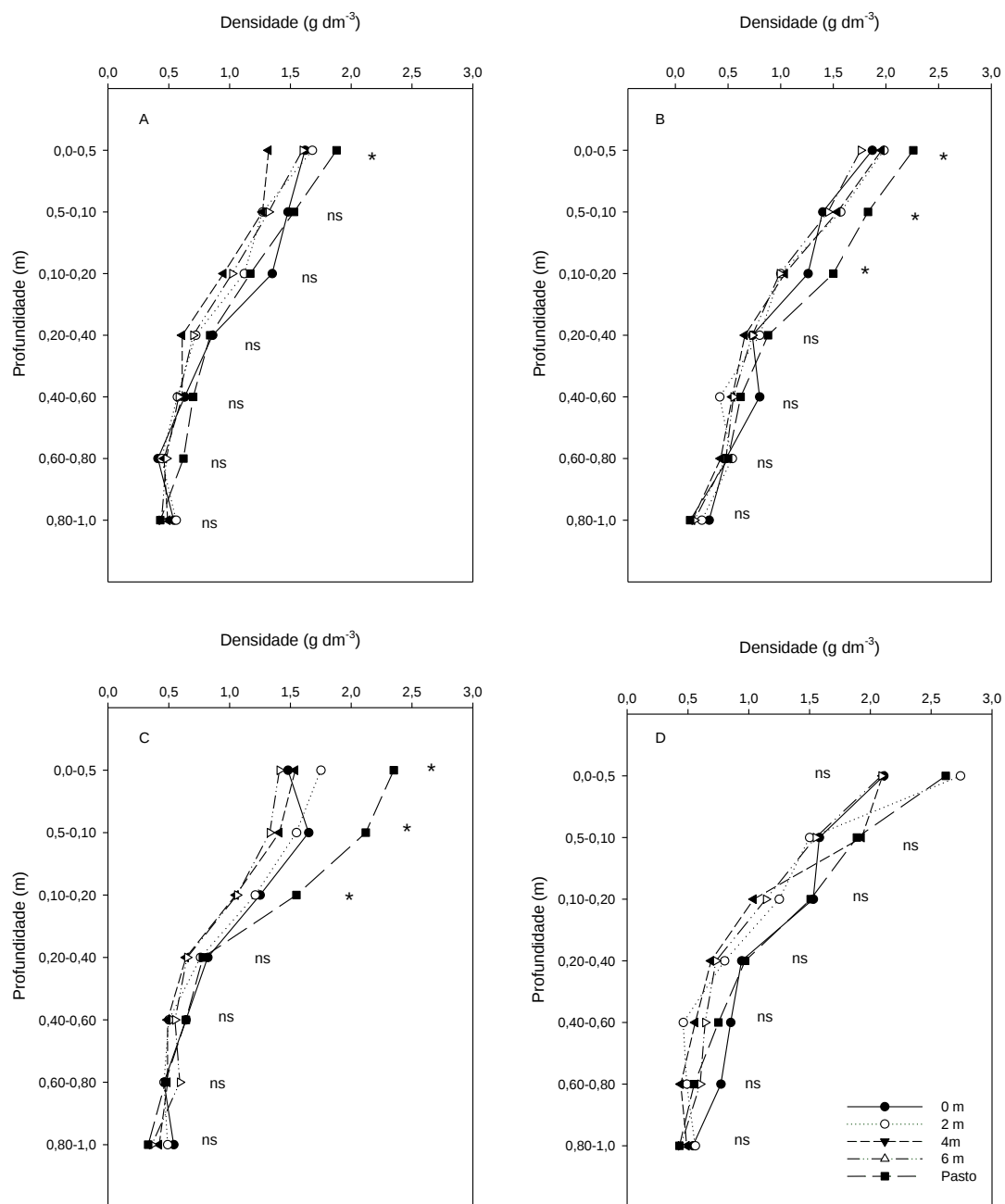
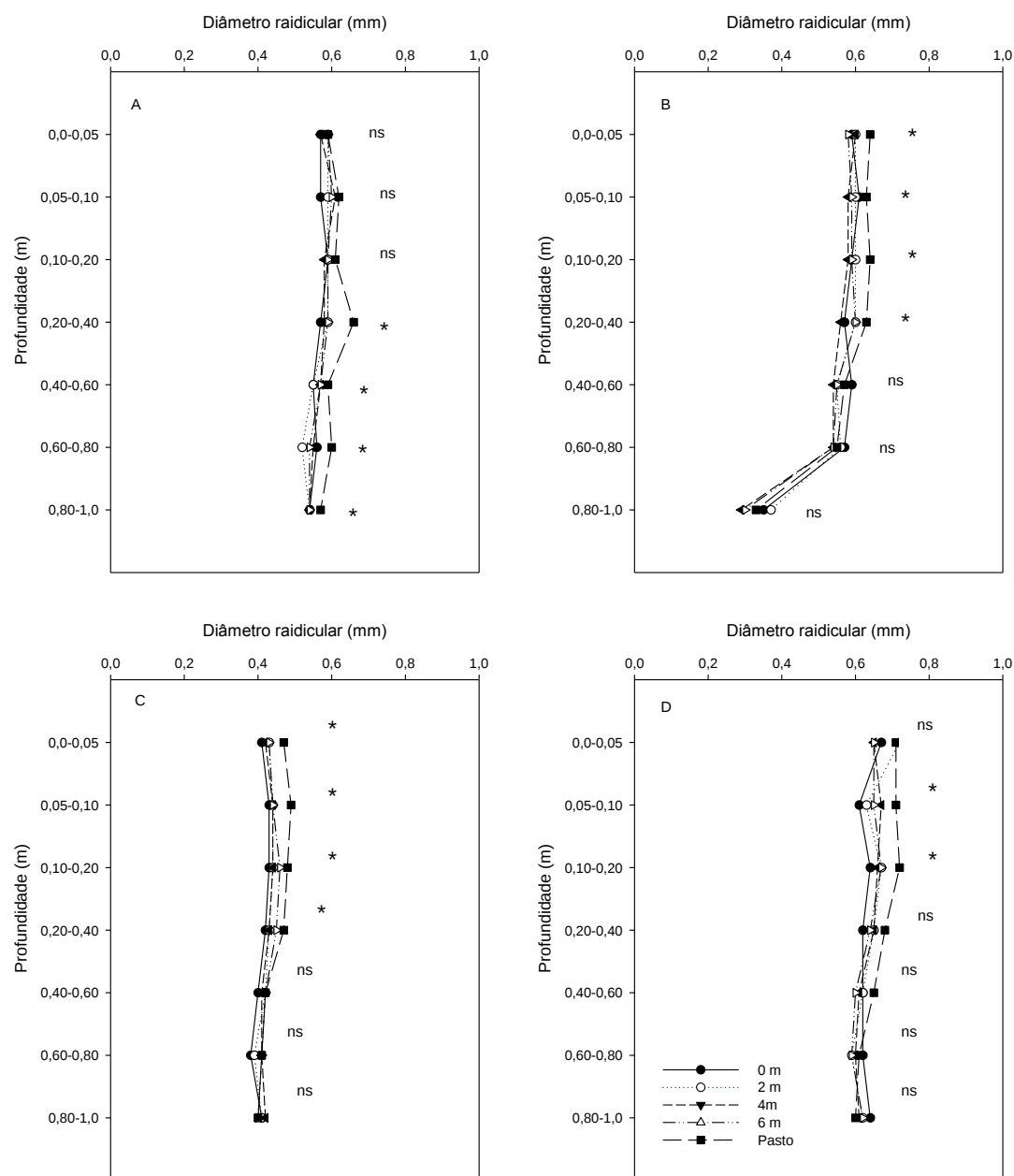


Figura 6 - Diâmetro radicular em sistema integrado de produção e pasto a pleno sol, abril (A) e outubro (B) de 2014, abril (C) e outubro (D) de 2015 (n = 6)



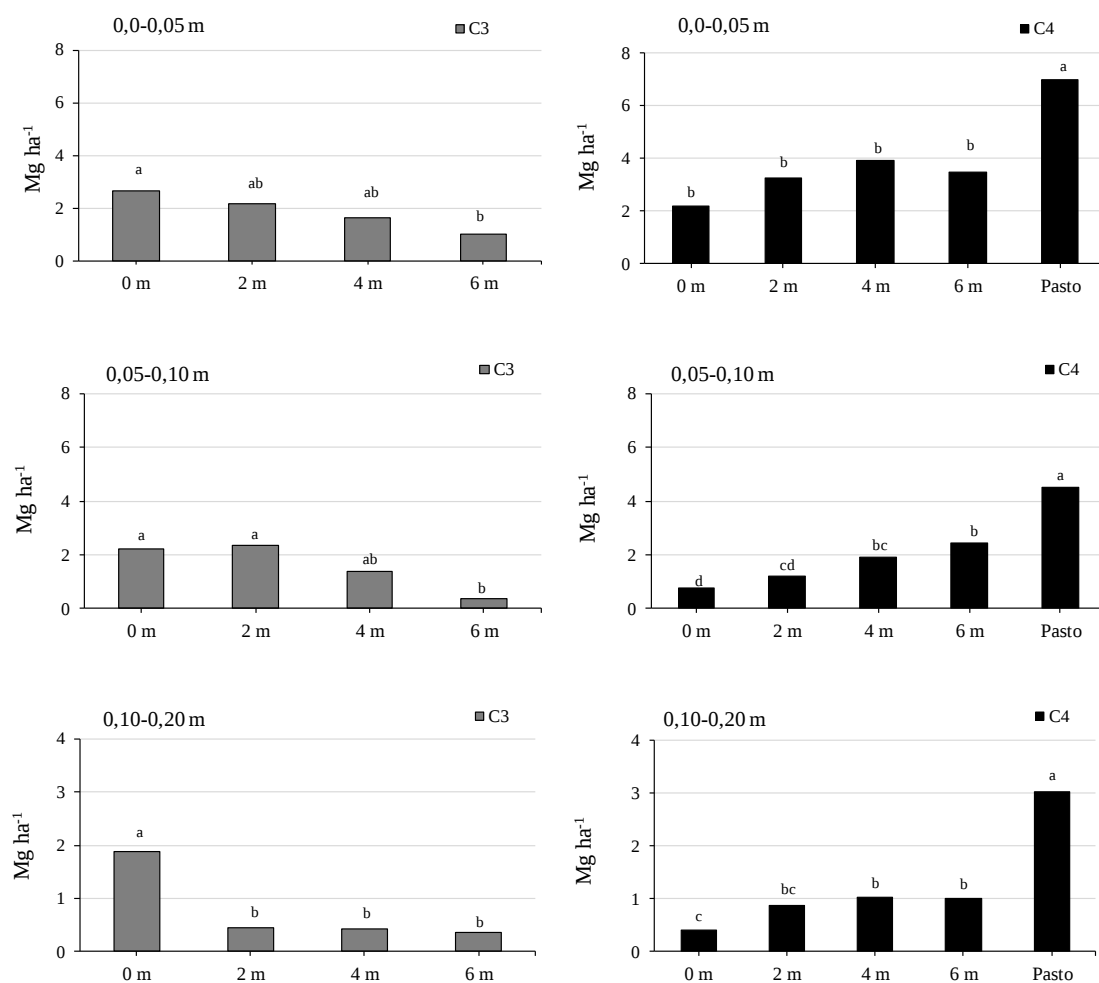
Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ das raízes foram típicos de espécies C_3 e C_4 , as raízes de *U. brizantha* (C_4) e eucalipto (C_3) apresentaram $\delta^{13}\text{C}$ de $-13,25 \text{ ‰}$ e $-28,86 \text{ ‰}$, respectivamente, o que está dentro do intervalo relatado por O'Leary (1988), foram utilizados para o cálculo da contribuição das raízes de cada espécie no solo.

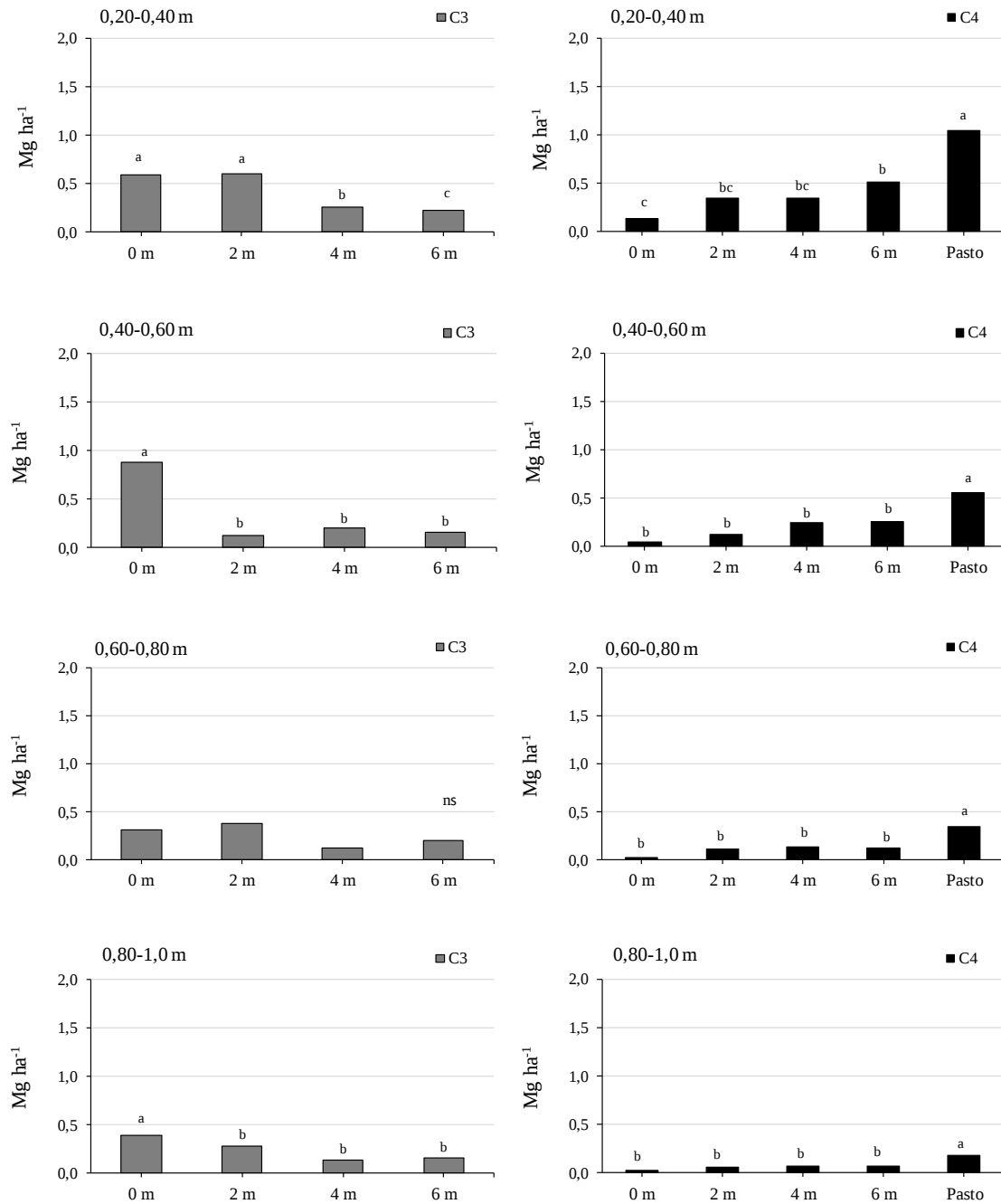
A biomassa de raízes de eucalipto (C_3) e *U. brizantha* (C_4) foi claramente influenciada pela distância do eucalipto, até 1 m de profundidade, em 2014 e 2015 (Figura

7). Da mesma forma que a parte aérea (Figura 3), a quantidade de raízes de *U. brizantha* foi menor à 0 m do eucalipto, e aumentou com a distância do eucalipto em abril de 2014 e outubro de 2015 (Figura 7).

O aumento da contribuição das raízes do eucalipto com o aumento da profundidade pode ser observado nos dois anos de avaliação. Demonstrando que a maior proporção das raízes da forrageira está na superfície do solo até 0,40 m de profundidade (Figura 7).

Figura 7 - Massa de matéria seca de raiz de eucalipto (C₃) e *U. brizantha* (C₄) em sistema integrado de produção e pasto a pleno sol, outubro de 2015 (n = 6)



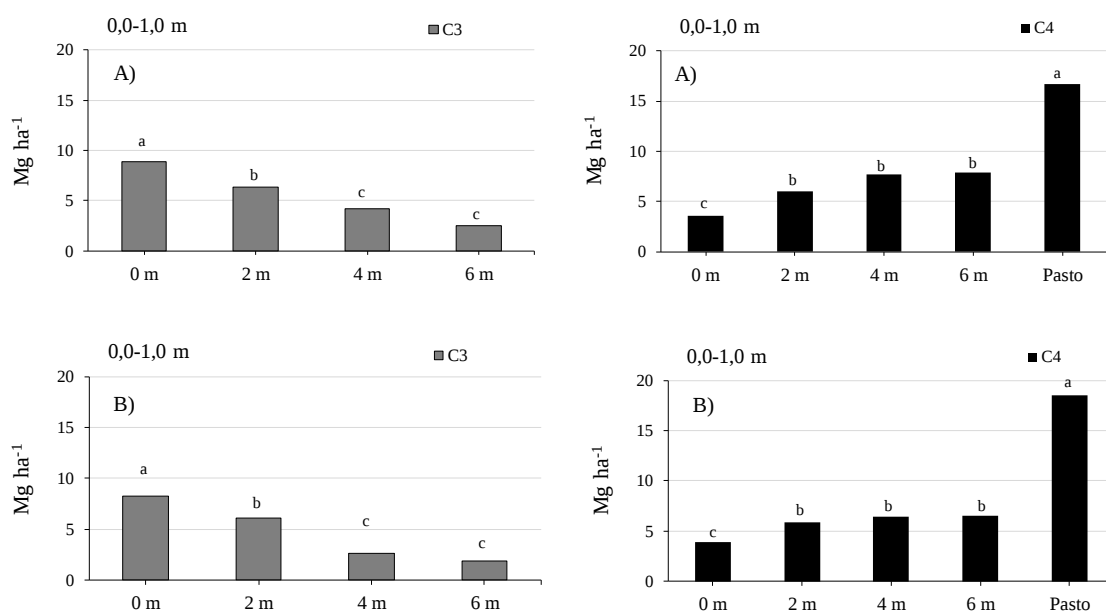


A produção de raiz de eucalipto acumulada até 1 m de profundidade em outubro de 2014, foi maior à 0 m ($8,9 \text{ Mg ha}^{-1}$), e diminuiu com o aumento da distância do eucalipto, 2 m ($6,3 \text{ Mg ha}^{-1}$), 4 m ($4,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) e 6 m ($2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Figura 8A). Na mesma época, a produção de raízes de *U. brizantha* acumulada até 1 m de profundidade foi maior na pastagem a pleno sol ($16,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), em relação ao sistema integrado, a 6 m ($7,9 \text{ Mg ha}^{-1}$), 4 m ($7,7 \text{ Mg ha}^{-1}$), 2 m ($6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) e 0 m ($3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) de distância do eucalipto.

Em abril de 2015, também fica evidente o maior acúmulo de raízes de eucalipto à 0 m ($8,3 \text{ Mg ha}^{-1}$) em relação a maiores distâncias do eucalipto, à 2 m ($6,1 \text{ Mg ha}^{-1}$), 4 m

(2,6 Mg ha⁻¹) e 6 m (1,8 Mg ha⁻¹). A produção de raízes de *U. brizantha* acumulada até 1 m de profundidade foi maior a pleno sol (18,5 Mg ha⁻¹), em relação ao sistema integrado aos 6 m (6,5 Mg ha⁻¹), 4m (6,4 Mg ha⁻¹), 2 m (5,8 Mg ha⁻¹) e 0 m (3,9 Mg ha⁻¹) (Figura 8B).

Figura 8 - Massa de matéria seca de raiz de eucalipto (C3) e *U. brizantha* (C4) acumulado até 1 m de profundidade em sistema integrado de produção e pasto a pleno sol, em outubro de 2014 (A) e abril de 2015 (B) (n = 6). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade

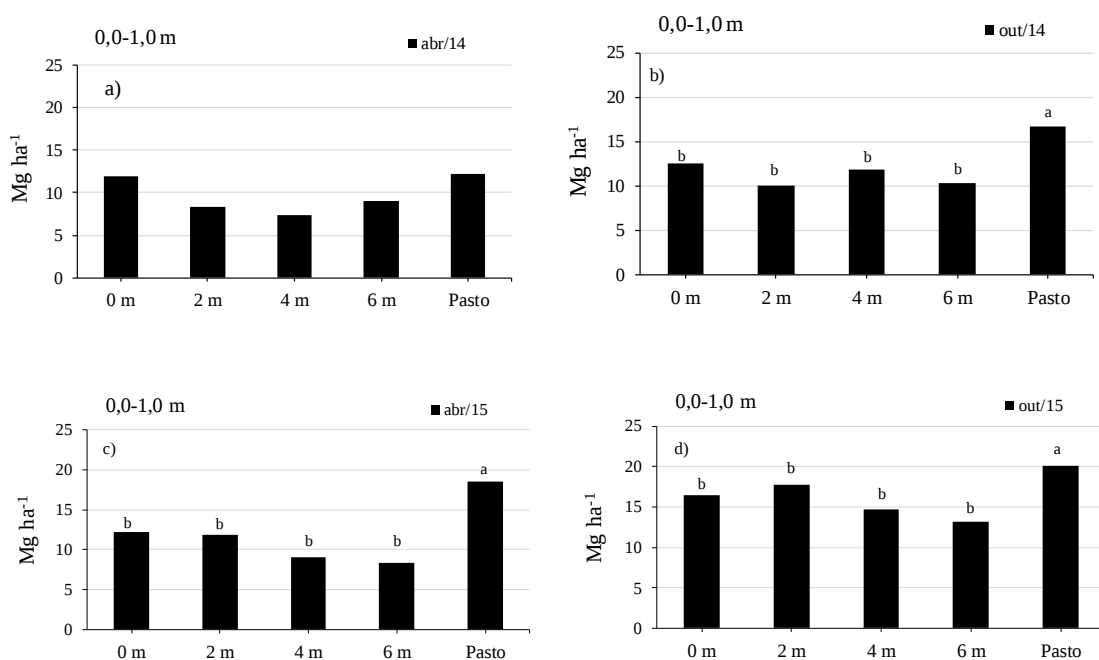


A produção total de raízes acumulada à 1 m de profundidade, em abril de 2014 (Figura 9a), não se diferiu entre os tratamentos, da mesma forma que a parte aérea nesse período (Figura 3A), a diferença na produção de raízes parece ser mais pronunciada em épocas de maior disponibilidade hídrica em relação a épocas de baixa disponibilidade hídrica. Em outubro de 2014, a quantidade de raízes foi maior no pasto à pleno sol (16,6 Mg ha⁻¹) em relação ao sistema integrado de produção que apresentou em média (11,16 Mg ha⁻¹) (Figura 9b), redução de 48,7 % na produção total de raízes no sistema.

No final do período chuvoso, abril de 2015, a produção total de raízes foi menor no sistema integrado de produção (10,4 Mg ha⁻¹) que no pasto a pleno sol (18,5 Mg ha⁻¹), redução de 77,9 % (Figura 9c). Isso se repetiu no início do período chuvoso, outubro de

2015, o pasto a pleno sol apresentou maior produção total de raízes (20 Mg ha⁻¹), em relação ao sistema integrado de produção (15,5 Mg ha⁻¹), não se diferenciando apenas aos 2 m (17,7 Mg ha⁻¹) (Figura 9d).

Figura 9 - Total de massa de matéria seca de raiz acumulado à 1 m de profundidade em sistema integrado de produção e pasto a pleno sol, abril de 2014 (a), outubro de 2014 (b), abril de 2015(c) e outubro de 2015 (d) (n = 6). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade



1.3 Discussão

1.4

A menor produção de forragem em abril de 2014, pode ser explicada pelo fato da amostragem ter ocorrido no início período de menor disponibilidade hídrica, com precipitação acumulada em abril de 32 mm, o que afetou crescimento da forrageira, justificando a baixa produção de forragem, com média de 2,0 Mg ha⁻¹. Além disso, a produção de forragem foi claramente reduzida pela inserção do eucalipto no sistema, esse efeito foi mais pronunciado em meses de maior disponibilidade hídrica e maior produção de forragem.

A produtividade de *U. brizantha* variou em médias de 2,2 a 5,0 Mg ha⁻¹ entre as épocas de amostragem, e de 0,73 a 8,1 Mg ha⁻¹ entre as distâncias do eucalipto, a diferença na magnitude dos resultados está no regime de chuvas e na inserção do eucalipto no sistema.

A menor produção de forragem próximo ao eucalipto está relacionada aos fatores de interação entre as espécies. Estudos mostraram que a forragem tem seu crescimento reduzido com sombreamento acima de 35-40 % (Guenni et al, 2008; Paciullo et al, 2007). No entanto, a *U. decumbens* é considerada tolerante ao sombreamento e responde com ajustes morfofisiológico, como o aumento da área foliar específica e a taxa de alongamento foliar, que permitem a manutenção da produtividade, mesmo sob condições de luz solar limitada (Guenni et al, 2008; Paciullo et al, 2008).

A redução do teor de água do solo próximo ao eucalipto pode ter sido o fator de maior influência no desenvolvimento da forragem. Redução na umidade do solo (2-7% vol.) próximo de espécies de rápido crescimento, como *E grandis* e *Grevillea robusta*, foi observado por Radersma e Ong (2004), essa redução foi relacionado à diferença no uso da água, em que o *Eucalyptus* e *Grevillea* apresentaram maior uso da água em relação a *Cedrella* e *Markhami*, em um Latossolo vermelho com 58 % de argila.

Na pastagem à pleno sol foi observado maior DRL principalmente nas camadas superficiais do solo. Segundo Gonçalves et al. (2001) e Laclau et al. (2004), este efeito se deve em particular a maior concentração de nutrientes na camada superficial, enriquecida pela ciclagem biogeoquímica de nutrientes. O hábito de crescimento radicular determina o volume de solo ocupado pelas raízes, a densidade de raízes está associada ao grau de exploração desse solo e à capacidade de eliminação ou dominação por espécies concorrentes (Gonçalves; Mello, 2005).

Semelhante à distribuição da parte aérea da forrageira, foi a distribuição de seu sistema radicular. Essa mudança na distribuição das raízes no sistema integrado de produção pode resultar mudança no valor isotópico $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo na área, a tendência é de que com o tempo o sinal isotópico do C da matéria orgânica do solo finque mais próximo a -28,86 ‰ próximo ao eucalipto, e à -13,25 ‰ à medida que se afasta do eucalipto pela maior contribuição da *U. brizantha* para a matéria orgânica do solo.

A distribuição vertical das raízes finas do eucalipto é muito importante para menor competição entre as espécies, nas camadas superficiais houve competição entre as raízes, isso indica que as estratégias de exploração do solo podem ser semelhantes, o que resultou em forte competição pelos recursos do solo. Segundo Forrester et al. (2006), a estratificação do sistema radicular é importante para a coexistência de diferentes espécies na mesma área, principalmente se os recursos forem limitantes.

Estudos recentes sob sistemas silvipastoris em diversas condições (Nair et al., 2010), mostraram que sistemas agrícolas integrados com árvores, em comparação com

sistemas sem árvores, armazenam mais C nas camadas mais profundas do solo e próximo as árvores em relação a maiores distâncias, e o maior teor de C orgânica do solo foi associado a maior riqueza de espécies e densidade da plantação. E que a quantidade de C sequestrado em sistemas agroflorestais dependia em grande parte, das condições ambientais e de gestão do sistema.

Fica evidente que a inserção do eucalipto em área de pastagem em Argissolo, reduz a quantidade de matéria orgânica aportada em profundidade no solo pelas raízes das plantas, e que pastagens bem manejadas podem fornecer maior quantidade de C ao solo proveniente das raízes em relação a sistemas integrados de produção agropecuário em solos de baixa fertilidade. Não houve sinergismo entre as espécies em relação a massa de matéria seca de raízes finas no consórcio. A massa de matéria seca de raiz indica que o eucalipto impôs forte competição por recursos do solo a *U. brizantha*, na maioria das épocas de amostragem. A competição ocorre quando as plantas interagem de modo que pelo menos uma exerça um efeito negativo sobre o outro (crescimento reduzido ou mortalidade) (Vandermeer, 1989), há alta competição entre as espécies em sistema integrado de eucalipto e pastagem, pela redução tanto da parte aérea quando das raízes em solo arenoso de baixa fertilidade em regiões tropicais.

A produção da parte aérea e raiz da forragem a pleno sol, em outubro de 2014, foi de 6,9 Mg ha⁻¹ acima do solo e 16,6 Mg ha⁻¹ abaixo (raízes) até 1 m de profundidade, a quantidade de raízes aportadas no solo foi 2,4 vezes a produção acima do solo. Em abril de 2015, a produção acima do solo foi de 8,1 Mg ha⁻¹ e abaixo 18,5 Mg ha⁻¹ na área de forragem a pleno sol até 1 m de profundidade, a produção de raízes foi 2,3 vezes maior que a parte aérea da forragem. Batlle-Bayer et al. (2010) também registraram um estoque de C na biomassa abaixo do solo, em média, três vezes superior a biomassa acima para pastagens na região do cerrado brasileiro. Estudos avaliando o crescimento de raízes indicaram que a contribuição relativa de raízes para o carbono orgânico do solo foi em média 2 vezes maior que da parte aérea (Rasse et al., 2005). Principalmente devido as raízes apresentarem maior proporção de tecidos lignificados do que a serapilheira da parte aérea do eucalipto, o que reduz o seu coeficiente de decomposição “k” no solo (Lemma et al., 2007).

Vários estudos apontam para o potencial das pastagens bem manejadas de *Urochloa* para aumentar o carbono orgânico do solo (d’Andréa et al., 2004; Marchão et al., 2009), com taxas de sequestro de 0,2-0,7 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (Batlle-Bayer, et al., 2010). Pastagens bem manejadas podem produzir grandes quantidades de C acima do solo (Fisher e Thomas,

2004), mantendo a cobertura e reduzindo assim a temperatura do solo e decomposição da matéria orgânica, além de possuir profundo enraizamento, mostrando grande capacidade de acumular C abaixo do solo. Isto também tem sido relatado para pastagens cultivadas na savana colombiana (Fisher et al., 1994). No entanto, o cultivo de árvores e/ou culturas em solos arenosos de baixa fertilidade continua sendo um desafio para os agricultores. Em solos inférteis ou em regiões semi-áridas, árvores geralmente mal manejadas, torna o ambiente inadequado para sistemas agroflorestais (Matthews, et al., 1992). Desta forma, se a produção de biomassa não for adequada, é improvável que ocorra alterações positivas nas propriedades do solo nos sistemas agroflorestais. Alguns resultados indicam inalteradas, ou mesmo declínio dos níveis de matéria orgânica do solo em sistemas integrados em solos de baixa qualidade e em ambientes secos (Mathuva et al., 1998, Samsuzzaman et al., 1999 e Akyeampong, 1999). Além disso, em ambientes secos, a competição de culturas arbóreas por água normalmente resulta em baixos rendimentos das culturas (Albrecht; Kandji, 2003).

O resultado mais interessante da investigação é que o carbono derivado das raízes da *U. brizantha* foi cerca de 2,35 vezes maior do que os resíduos acima do solo dessas plantas. Nossos resultados suportam fortemente a hipótese de que a inserção do eucalipto em áreas de pastagem pode modificar a quantidade e distribuição do sistema radicular das espécies em profundidade, além de afetar o crescimento das plantas forrageiras, e que o carbono derivado das raízes das plantas contribui mais para estoque de C no solo em profundidade que os resíduos acima do solo.

1.5 Conclusões

1. A inserção do eucalipto na pastagem reduz a produtividade de forragem próximo ao eucalipto. A produção de forragem a pleno sol é superior ao sistema integrado pelo menos até 2 m de distância do eucalipto. A produtividade de forragem aumenta ao longo do transecto de 1,7 Mg ha⁻¹ próximo do eucalipto para 4,45 Mg ha⁻¹ aos 6 m do eucalipto.

2. A densidade de comprimento radicular é modificada mais na superfície do solo, principalmente até 0,4 m, a inserção do eucalipto em área de pastagem reduz a densidade de comprimento radicular das espécies integradas.

3. As raízes de eucalipto (C₃) são mais abundantes próximo das árvores, e são reduzidas com a distância do eucalipto, por outro lado, as raízes de *U. brizantha* (C₄) são

mais abundantes aos 6 m, e se reduzem quando se aproxima das árvores de eucalipto em todas as profundidades até 1 m.

4. A quantidade total de raízes no solo é menor com a inserção do componente florestal em área de pastagem bem manejada, de 11,6 Mg ha⁻¹ em sistema integrado de produção para 18,4 Mg ha⁻¹ na pastagem a pleno sol, correspondendo a redução de 36% na quantidade de raízes no solo até 1 m de profundidade.

5. A assimetria do crescimento radicular foi elevada entre as espécies, reflexo da grande competição por água e luz na parte aérea. Não houve clara estratificação de exploração das camadas do solo pelo sistema radicular das espécies.

6. O *E. urograndis* apresentou exploração radicular em todas as camadas do solo, fazendo com que o desenvolvimento radicular da *U. brizantha* fosse prejudicado em sistema integrado. O elevado grau de competição no desenvolvimento radicular das espécies resultou, aos 70 meses, na camada 0,0-0,20 m, numa diferença de 30 % na densidade de raízes finas (drf) entre as espécies.

1.6 Agradecimentos

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento pessoal de Nível Superior). À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de doutorado e financiamento das pesquisas Processos nº 2014/10656-3 e 2016/14323-4.

Referências

- Alvares, CA, Stape, JL, Sentelhas, PC, Gonçalves, JLdeM, Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* **22**: 711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Akyeampong, E. (1999). Suitability of six hedgerow species for alley cropping on an acid infertile soil in Burundi. *Tropical Agriculture Journal* **76**: 83-87. DOI: 10.1023/A:102399860
- Albrecht, A, Kandji, ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **99**: 15-27. DOI: 10.1016/S0167-8809(03)00138-5
- Andréa, AFd', Silva, MLN, Curi, N, Guilherme, LRG. 2004. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de

manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **39**: 179–186. DOI: 10.1590/S0100-204X2004000200012

Balesdent, J., Mariotti, A., (1996). Measurement of soil organic matter turnover using ^{13}C natural abundance. In: Boutton, T.W., Yamazaki, S. (Eds.) *Mass Spectrometry of Soils*. Marcel Dekker, New York, pp. 83–111.

Bauhus, J, Khanna, PK, Menden, N. 2000. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *Canadian Journal of Forest Research* **30**: 1886-1894. DOI: 10.1139/x00-141

Battle-Bayer L, Batjes, NH, Bindraban OS. 2010. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **137**: 47-58. DOI: 10.1016/j.agee.2010.02.003

Carvalho, JLN, Raucci, GS, Frazao, LA, Cerri, EC, Bernoux, M, Cerri, CC 2014. Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gases emissions in the Brazilian Cerrado. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **183**: 167–175. DOI: 10.1016/j.agee.2013.11.014

Dixon, RK, Winjum, JK, Schroeder, PE. 1993. Conservation and sequestration of carbon: the potential of forest and agroforest management practices. *Global Environmental Change* **2**: 159–173.

Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA 2013. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3th Edition. Brasília, 353 p.

Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. 2nd Edition. Rio de Janeiro, 212 p.

Ferreira, D F. 2011. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras* **35**: 1039-1042. DOI: 10.1590/S1413-70542011000600001

Fisher, M, Thomas, R. 2004 Implications of land use change to introduced pastures on carbon stocks in the central lowlands of Tropical South America. *Environment, Development and Sustainability* **6**: 111–131. DOI: 10.1023/B:ENVI.0000

Fisher, MJ, Rao, IM, Ayarza, MA, Lascano, CE, Sanz, JI, Thomas, RJ, Vera, RR. 1997. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savanas. *Nature* **371**: 236–238. DOI :10.1038/371236a0;

Forrester, DI, Bauhus, J, Cowie, AL, Vanclay, JK. 2006. Mixed-species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: A review. *Forest Ecology and Management* **233**: 211–230. DOI:10.1016/j.foreco.2006.05.012

- Gifford, RM. 2000. Carbon contents of above-ground tissues of forest and woodland trees. National Carbon Accounting System, Technical Report No. 22, Australian Greenhouse Office, Canberra. September 2000.
- Gonçalves, JLM, Mendes, KCFS, Sasaki, CM. 2001. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais implantados do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **25**: 601-616 DOI: 10.1590/S0100-06832001000300009
- Gonçalves, J. L. M.; Mello, S. L. M. (2005). O sistema radicular das árvores. In: *Nutrição e fertilização de florestas*. Piracicaba: IPEF, p. 221-267.
- Guenni, O, Seiter, S, Figueroa, R. 2008. Growth responses of three *Brachiaria* species to light intensity and nitrogen supply. *Tropical Grasslands* **42**: 75-87.
- Lemma, B, Nilsson, I, Berggren, D, Olsson, M, Kinker, H. 2006. Decomposition and substrate quality of leaf litter and fine roots from three exotic trees and native forest in the southwestern highlands of Ethiopia. *Soil Biology and Biochemical* **39**: 2317–2328. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.03.032
- Lemaire, G, Franzluebbers, A, Carvalho, PC, Dedieu, DF. 2014. Integrated crop–livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **190**: 4–8. DOI: 10.1016/j.agee.2013.08.009
- Marchão, RL, Becquer, T, Brunet, D, Balbino, LC, Vilela, V, Brossard, M. 2009 Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop-livestock management systems. *Soil & Tillage Research* **103**: 442–450. DOI: 10.1016/j.still.2008.11.002
- Mathuva, MN, Rao, MR, Smithson, PC, Coe, R. 1998. Improving maize yields in semi-arid highlands of Kenya: agroforestry or fertilisers? *Field Crops Research* **55**: 57–72. DOI: 10.1016/S0378-4290(97)00067-1
- Matthews, RB, Lungu, S, Volk, J, Holden, S., Solberg, K. 1992. The potential of alley cropping in improvement of cultivation systems in the high rainfall areas of Zambia. II. Maize production. *Agroforestry Systems* **17**: 241–261. DOI:10.1007/BF00054150
- Neufeldt, H, Wilkes, A, Zomer, RJ, Nang’ole, E, Munster, C, Place, F. 2009. Trees on farms: Tackling the triple challenges of mitigation, adaptation and food security. World Agroforestry Centre Policy Brief. *World Agroforestry Centre*, Nairobi, Kenya.
- O’Leary, M. 1988. Carbon isotopes in photosynthesis. *BioScience* **38**: 328–336. DOI: 10.2307/1310735

- Paciullo, DS., Campos, NR, Gomide, CAM, Castro, CRT, Tavela, RC, Rossiello, ROP. 2008. Growth of signalgrass influenced by shading levels and season of the year. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **43**: 317-323. (in Portuguese, with abstract in English). DOI: 10.1590/S0100-204X2008000700017
- Paciullo, DS, Carvalho, CAB, Aroeira, LJM, Morenz, MJF, Lopes, FCF, Rossiello, ROP. 2007. Morphophysiology and nutritive value of signalgrass under natural shading and full sunlight. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **42**: 573-579. (in Portuguese, with abstract in English). DOI: /10.1590/S0100-204X2007000400016
- Powlson, DS, Brookes PC, Whitmore, PA, Goulding, KWT, Hopkins, DW. 2014. Soil organic matters. *European Journal of Soil Science* **62**: 1–4. DOI: 10.1007/s10661-017-5881-y
- Raij, BVan, Quaggio, JA. 1983. *Métodos de análise de solo para fins de fertilidade*. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas. 170 p. (Boletim Técnico, 81).
- Radersma, S, Ong, CK. 2004. Spatial distribution of root length density and soil water of linear agroforestry systems in sub-humid Kenya: Implications for agroforestry models. *Forest Ecology and Management* **188** (1-3): 77-89. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.021 DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.021
- Rasse, DP, Rumpel, C, Dignac, MF. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant Soil* **269**: 341–356. DOI: 10.1007/s11104-004-0907-y
- Rosolem, CA, Steiner, F, Zoca, SM, Ducatti, C. 2012. Nitrogen Immobilization by Congo Grass Roots Impairs Cotton Initial Growth. *Journal of Agricultural Science* **4**: 126-136. DOI: 10.5539/jas.v4n9p126
- Salton, JC, Mercante, FM, Tomazi, M, Zanatta, JA, Concenço, G, Silva, WM, Retore, M. 2014. Integrated crop–livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **190**: 70–79. DOI: 10.1016/j.agee.2013.09.023
- Samsuzzaman, S, Garrity, DP, Quintana, RU, 1999. Soil property changes in contour hedgerow systems on sloping land in the Philippines. *Agroforestry Systems* **46**: 251–272. DOI: 10.1023/A:1006049711801
- Schroth, G, Zech, W. 1995. Above and belowground biomass dynamics in a sole cropping and an alley cropping system with *Gliricidia sepium* in the semi-deciduous rainforest zone of West Africa. *Agroforestry Systems* **31**: 181–198. DOI: 10.1007/BF00711725

- Shibu, J, Willians, R, Zamora, D. 2006 Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations. *Forest Ecology and Management* **233**: 231-239. DOI:10.1016/j.foreco.2006.05.014.
- Staff, SS. 2014. *Keys to soil taxonomy*. 12th Edition. Edn., Washington, DC.: USDA–Natural Resources Conservation Service.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersects method of estimating root length. *Journal of Ecology* **63**: 995-1001. DOI: 10.2307/2258617
- Vandermeer, J. 1989. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge University Press, New York.
- Kittur, BH, Sudhakara, K, Kumar, BM, Kunhamu, TK, Sureshkumar, P. 2015. Bamboo based agroforestry systems in Kerala, India: performance of turmeric (*Curcuma longa* L.) in the subcanopy of differentially spaced seven year-old bamboo stand. *Agroforestry System* **90**: 237-250. DOI: 10.1007/s10457-015-9849-z
- Yoneyama, T Nakanishi, Y, Morita, A, Liyanage, BC. 2001. $\delta^{13}\text{C}$ values of organic carbon in cropland and forest soils in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* **47**: 17–26. DOI: 10.1080/00380768.2001.10408364

CAPÍTULO 2

Contribuição do eucalipto integrado com *U. Brizantha* para a matéria orgânica do solo

Resumo

Isótopos estáveis do carbono ($\delta^{13}\text{C}$) podem servir como marcador natural das plantas, permitindo discriminar a contribuição de cada espécie para a matéria orgânica do solo (MOS), no entanto pouco se sabe sobre as mudanças do estoque de carbono em camadas mais profundas em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA). O objetivo do trabalho foi investigar se a inserção do eucalipto em área de pastagem pode modificar os estoques de carbono orgânico no perfil do solo até 1 m de profundidade. Em segundo lugar, identificar pela abundância isotópica do ^{13}C , a conversão da MOS da *U. brizantha* (C_4) e eucalipto (C_3) em SIPA em região tropical. O sistema era composto por 2 eucaliptos integrado com a forrageira [*Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) R. Webster ‘Marandu’], e uma pastagem a pleno sol como referência. Seis anos após a implantação do sistema, os estoques de C variaram de 62–65 Mg ha^{-1} no sistema integrado de produção, não diferindo entre os eucaliptos, e nem quanto às distâncias do eucalipto. O sistema integrado de produção manteve os estoques de C na condição inicial (66 Mg ha^{-1}). Os estoques de C foram maiores na pastagem a pleno sol em relação ao SIPA apenas na camada superficial do solo, 0-0,05 m de profundidade. A inserção do eucalipto na pastagem não alterou o $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo seis anos após a implantação do sistema integrado.

Palavras-chave: C_3 , C_4 , estoque de C, sistemas integrados de produção agropecuária, silvopastoril

Contribution of eucalyptus integrated with *U. Brizantha* to soil organic matter

Abstract

Stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) can serve as a natural marker of plants, allowing to discriminate the contribution of each species to soil organic matter (SOM), however little

is known about changes in carbon stocks in deeper layers an integrated crop–livestock system (ICLS). The objective of this work was to investigate if the insertion of eucalyptus in a pasture area can modify the organic carbon stocks in the soil profile up to 1 m depth. Second, to identify the isotopic abundance of ^{13}C , the conversion of the *U. brizantha* (C_4) and eucalyptus (C_3) SOM, into ICLS in tropical region. The system was composed of two eucalyptus integrated with the forage [*Urochloa brizantha* (Hochst. Ex A. Rich.) R. Webster 'Marandu'], and a pasture in full sun as a reference. Six years after the system's implantation, C stocks ranged from 62-65 Mg ha^{-1} in the integrated production system, not differing between eucalyptus, nor for eucalyptus distances. The integrated production system maintained the stocks of C in the initial condition (66 Mg ha^{-1}). The C stocks were higher in the pasture than in the ICLS only in the topsoil, 0-0.05 m depth. The insertion of eucalyptus in the pasture area did not alter the $\delta^{13}\text{C}$ of soil organic matter six years after the implementation of the integrated system.

Key words: C_3 , C_4 , C stock, integrated crop-livestock system, silvopastoril

2.1 Introdução

O sequestro de carbono (C) atmosférico e armazenamento na biosfera terrestre, é uma das opções que tem sido proposta para mitigar a emissão de gases do efeito estufa, uma vez que o solo é o maior reservatório de C em ambientes terrestres. Desta forma, os sistemas integrados de produção têm recebido reconhecimento não só pela sustentabilidade agrícola, mas também pelas questões relacionadas às mudanças climáticas no planeta (Albrecht; Kandji, 2003). Já que sistemas agroflorestais tem como principal objetivo aumentar a produtividade e a eficiência do uso da terra (Nair et al., 2013), desta forma tendem a sequestrar maiores quantidades de carbono do que os sistemas agrícolas sem árvores (Nair et al., 2010; Zomer et al., 2016). No entanto, o potencial dos sistemas agroflorestais no sequestro C varia em função da espécie, idade das árvores, localização geográfica, fatores locais e regimes climático (Kittur et al., 2016).

A determinação da abundância isotópica natural de carbono em estudo da MOS surgiu como uma ferramenta para rastrear a origem da MOS de diferentes grupos de plantas C_3 e C_4 , uma vez que a abundância natural de C permite caracterizar a MOS e está relacionada com a via fotossintética da fixação do isótopo C da vegetação. Plantas do tipo C_3 (por exemplo, eucaliptos) discriminam parte de ^{13}C em comparação com ^{12}C , resultando

em níveis mais baixos de ^{13}C ; e plantas do tipo C_4 (a maioria das gramíneas) fixam ^{13}C em proporções mais elevadas do que tipo C_3 , isso cria diferença na abundância natural de ^{13}C (Golchin et al, 1995; Severo et al, 2017).

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ de plantas C_3 normalmente variam de -30‰ a -22‰ (média = -27‰), enquanto os valores de plantas C_4 variam de -15‰ a -9‰ (média = -13 ‰) (O'Leary, 1998). Em seguida, é possível calcular a proporção de carbono derivado de plantas C_3 e C_4 , através de equação de mistura de massa (Balesdent & Mariotti, 1996; Yoneyama et al., 2001). Quando uma planta C_3 é introduzida em um sistema que já havia sido submetido a uma planta C_4 (ou vice-versa), a contribuição relativa do novo C comparado ao antigo pode ser quantificada usando o balanço de massa do conteúdo isotópico estável com base na alteração em $\delta^{13}\text{C}$ assinatura do carbono orgânico do solo (Dawson et al., 2002). Em sistema integrado de árvores e gramíneas, as entradas de C_3 são dominadas por arbustos ou árvores de madeira e as entradas de C_4 são dominadas pelo capim (Monroe et al., 2016). Nestes sistemas integrados de produção agropecuária à base de eucalipto onde plantas C_3 e C_4 são cultivadas, são raros ou ausentes os estudos que usam abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ para entender a dinâmica C (Tonucci et al., 2017).

A importância dos sistemas integrados com relação ao sequestro de C está sendo amplamente reconhecido, mas ainda há escassez de dados quantitativos sobre o estoque de carbono no solo em regiões tropicais. Além disso, a inserção do eucalipto em área de pastagem pode modificar a quantidade e distribuição do aporte de MOS.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi investigar se a inserção do eucalipto em área de pastagem pode modificar o estoque de carbono orgânico do solo. Em segundo lugar, identificar conversão da matéria orgânica do solo (MOS), proveniente da pastagem (C_4) e do eucalipto (C_3) em SIPA. O objetivo da pesquisa foi fornecer informações sobre o potencial desses sistemas de uso do solo no sequestro de C a fim de compensar as emissões de CO_2 atmosféricas.

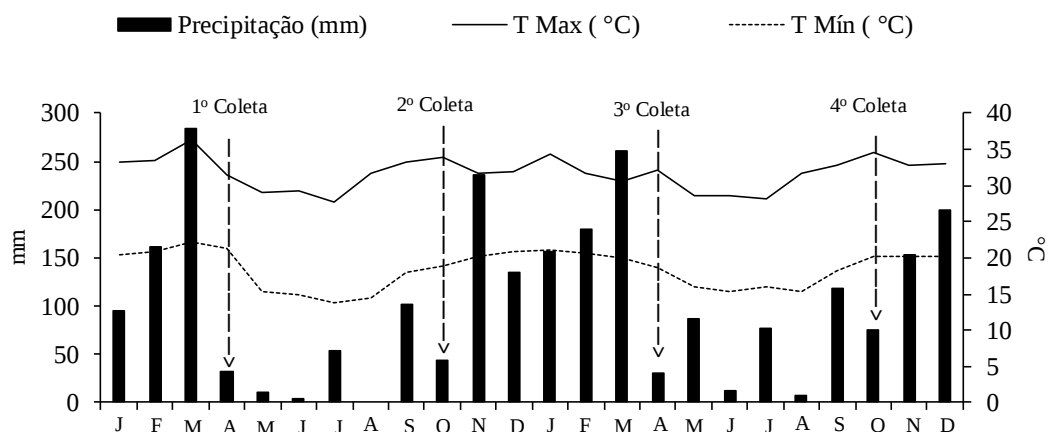
2.2 Material e Métodos

Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado em sistema integrado de produção agropecuária, instalado em 2009, no município de Votuporanga-SP, Brasil. Coordenadas geográficas 20° 28' de Latitude Sul e 50° 04' de Longitude Oeste, apresentando relevo suave-ondulado e altitude de 410 a 490 m, em uma área de 6 ha. O clima de acordo com a classificação de Köppen é

do tipo Cwa (Alvares et al., 2013), tropical de altitude com inverno seco e verão quente, temperatura média anual de 24 °C, tendo a média das máximas de 30 °C e a média das mínimas de 18 °C, e precipitação pluviométrica média anual é de 1448,7 mm, dados meteorológicos da área (Figura 1).

Figura 1 - Precipitação, temperatura máxima e mínima da área experimental, ano de 2014 e 2015



Segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (Embrapa, 2013), o solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico ou Arenic Hapludult (Soil Survey Staff, 2014), de textura arenosa, os atributos químicos foram analisados segundo Raij & Quaggio (1983) e físicos de acordo com Embrapa (1997), e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas e físicas de amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico

Profundidade	P	MO	pH	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Al ³⁺	V
m	(Resina) mg dm ⁻³	g kg ⁻¹	CaCl ₂			mmol _c dm ⁻³			%
0-0,05	2,89	14,2	4,9	1,57	19,4	13,7	24	0,36	55
0,05-0,10	0,78	12,9	4,7	1,32	7,0	4,1	31	1,12	29
0,10-0,20	0,33	11,5	4,9	1,04	6,2	3,1	32	1,39	25
0,20-0,40	0,35	10,4	4,7	0,71	7,5	3,3	31	1,28	27
0,40-0,60	0,30	9,8	5,1	0,88	8,0	3,3	22	2,47	35
0,60-0,80	0,44	9,8	5,2	0,80	8,2	3,5	21	1,69	26
0,80-1,00	0,44	7,2	5,3	0,57	9,1	3,8	19	1,40	41
	Areia	Silte		Argila		Ds		Textura	
m		g kg ⁻¹				Mg m ⁻³			
0-0,05	816	102		82		1,58		Arenosa	
0,05-0,10	820	73		107		1,60		Arenosa	
0,10-0,20	809	68		123		1,60		Arenosa	
0,20-0,40	783	75		142		1,60		Arenosa	
0,40-0,60	776	69		155		1,55		Média	
0,60-0,80	746	62		192		1,53		Média	
0,80-1,00	728	64		208		1,47		Média	

Histórico da área

O experimento foi implantado em uma pastagem degradada, com dez anos idade, de seis hectares, inicialmente foi preparada de forma convencional, através de arações e gradagens, e aplicação de 2000 kg ha⁻¹ de calcário. Após preparo, semeou-se o milheto (*Pennisetum glaucum*), setembro de 2009. Em outubro de 2009, realizou-se fosfatagem a lanço, e o sulcamento para o plantio do eucalipto, em linha simples sobre os terraços, no espaçamento de 2 × 12 m, sentido leste-oeste acompanhando as curvas de nível, utilizando mudas de 3 meses de idade, na densidade de 370 plantas ha⁻¹.

Dois eucaliptos foram plantados: *E. grancam* 1277 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*) e *E. urograndis* H-13 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), a parcela (aproximadamente 1 hectare) era composta por duas linhas do mesmo eucalipto. No verão, safra 2009/10, foi semeado soja sobre a palhada do milheto em sistema plantio direto, e após semeou-se *C. juncea* na safrinha; no verão, safra 2010/11 semeou-se milho em consórcio com *U. brizantha* cv. Marandu, e após a colheita do milho o a forragem se estabeleceu na área.

Aos dois anos de idade do eucalipto integrado com a *U. brizantha*, foi realizado desbaste das árvores até 12 m de altura, desbastando-se 2/3 da copa, a fim de proporcionar maior luminosidade a forrageira. Anualmente, era feita adubação a lanço nitrogenada na

pastagem, na dose de 200 kg ha⁻¹ de N (ureia), no início do período de maior precipitação (outubro). Em setembro de 2011, foram introduzidos bovinos de corte (mestiços), com 28 meses recém-desmamados, em sistema de pastejo contínuo, com lotação de 2 UA ha⁻¹, mantidos até o momento do abate.

Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 4, com três repetições. Os tratamentos constaram de dois eucaliptos de *E. grancam* 1277 e *E. urograndis* H-13, e quatro locais de amostragens: à 0, 2, 4 e 6 m de distância do eucalipto. Cada profundidade foi analisada separadamente. Além disso, utilizou-se uma pastagem a pleno sol como referência.

Avaliações da Matéria orgânica do solo

Carbono total (CT) e estoque de C no solo

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2015, seis anos após a implantação do sistema, em sete profundidades: 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,0 m, além disso foram abertas trincheiras de 1,5 m de profundidade, para coleta de amostras indeformadas para determinação de densidade do solo. As amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm. O teor de CT foi determinado, pelo método de combustão a seco (900 °C) usando um analisador elementar CN (Flash EA 1112 Series Thermo Finnigan Italia S.p.A., MI, Italy). O estoque de C no solo foi calculado a partir da concentração de C por unidade de massa de solo, BD de solo e profundidade do solo.

Os estoques de C do solo foram estimados por meio da seguinte equação:

$$C = CO \times Ds \times E$$

Em que: C é o estoque de C orgânico na camada de solo (Mg ha⁻¹), CO é o teor de C orgânico total na camada de solo (%), Ds é a densidade do solo na camada de solo (Mg m⁻³) e E é a espessura da camada amostrada (cm).

Composição Isotópica da Parte Aérea e Matéria Orgânica do solo

Amostras da parte aérea das plantas de eucalipto (C₃) e *U. brizantha* (C₄) foram moídas em moinho criogênico à base de nitrogênio líquido (Spex - Modelo 6700), pesadas (50-70 µg) em cápsulas de estanho, e analisadas em analisador elementar automático (Carlo

Erba EA 1108 - Fisons, Milão - Itália). Das amostras de solo foram removidos raízes e resto da serapilheira, para serem moídas em moinho de bola por 5 min, pesadas 1000–1250 µg de solo, e acondicionadas em cápsulas de estanho de 6 mm de altura e 4 mm de diâmetro (Modelo D1106-Elementar Microanalysis Limited), e analisadas em analisador elementar automático (Carlo Erba EA 1108 - Fisons, Milão - Itália), que por combustão determina a concentração de carbono orgânico do solo. O gás proveniente da combustão foi purificado numa coluna de cromatografia gasosa e introduzido diretamente num espectrômetro de massas de razão isotópica (IRMS) Finnigan MAT Delta Plus. A abundância natural de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) foi expressa em partes por 1.000 (‰) em relação ao padrão internacional Pee Dee Belemnita (PDB), através da equação:

$$\delta = (R \text{ amostra} / R \text{ padrão} - 1) \times 1000$$

Onde R é a razão molar $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ na amostra e no padrão.

O compartimento de C derivado da pastagem (C_4) foi calculado conforme Bernoux et al. (1998); Vitorello et al. (1989):

$$\% \text{ C}_4 = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{solo}} - \delta^{13}\text{C}_3}{\delta^{13}\text{C}_4 - \delta^{13}\text{C}_3}$$

Em que $\delta^{13}\text{C}_{\text{solo}}$ é a abundância natural do ^{13}C nas amostras de solo, $\delta^{13}\text{C}_3$ é abundância natural do ^{13}C nas amostras das plantas C_3 (eucalipto), $\delta^{13}\text{C}_4$ é abundância natural do ^{13}C nas amostras das plantas C_4 (*U. brizantha*). Os valores de $\delta^{13}\text{C}_3$ e $\delta^{13}\text{C}_4$ foram determinados em amostras de material vegetal de eucalipto e de pastagem, respectivamente. A contribuição percentual do C orgânico originário das plantas C_3 (eucalipto) foi calculada como $\% \text{ C}_3 = 100 - \% \text{ C}_4$.

Análise estatística

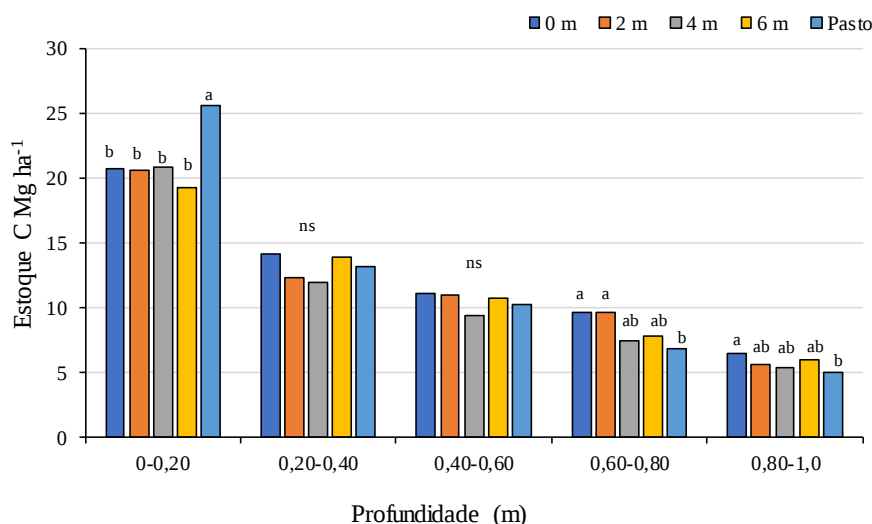
Os resultados obtidos foram verificados quanto às pré-suposições da análise de variância (normalidade e independência dos resíduos; homogeneidade da variância). Atendidos esses requisitos, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F 5 % ($p < 0,05$), os resultados foram analisados no programa estatístico Sisvar® (Ferreira, 2011). Quando verificadas diferenças, as médias foram comparadas pelo teste t (LSD) a 5 % de probabilidade.

2.3 Resultados

Estoque de Carbono no solo

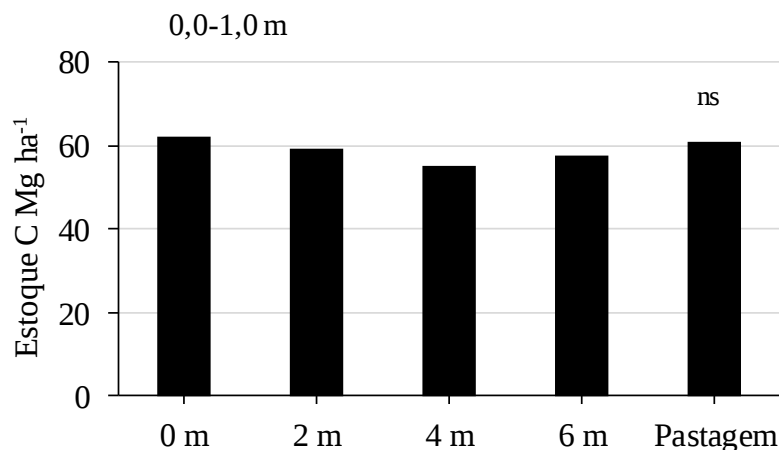
Seis anos após a implantação do SIPA, os estoques de C no solo não diferiram entre os eucaliptos implantados, desta forma foram apresentadas as médias dos dois eucaliptos (Figura 2). No sistema integrado de produção, o estoque de C no solo não se diferenciou estatisticamente quando a distância do eucalipto no perfil do solo até 1 m de profundidade. No entanto, com relação aos sistemas de produção, a pastagem a pleno sol apresentou maiores estoques de C ($25,61 \text{ Mg ha}^{-1}$), em relação ao sistema integrado de produção agropecuária ($20,38 \text{ Mg ha}^{-1}$) na camada de 0-0,20 m de profundidade (Figura 2). Nas camadas mais profundas do solo 0,6-0,80 e 0,80-1,0 m, observou-se maiores estoques de C próximo a linha das árvores de eucalipto ($9,6$ e $6,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), esses valores foram superiores aos observados na pastagem a pleno sol ($6,7$ e $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Figura 2).

Figura 2 - Estoque de C no solo em sistema integrado de produção e na pastagem a pleno sol, outubro de 2015. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade (n=6)



O estoque total de C no perfil do solo até 1,0 m de profundidade, variou de 62 a 65 Mg ha^{-1} no sistema integrado de produção, não diferindo entre os eucaliptos, e nem quanto às distâncias do eucalipto (Figura 3), mantendo os estoques de C na condição inicial (66 Mg ha^{-1}). No entanto, com a inserção do eucalipto, pode-se observar uma tendência de aumento do estoque de C adjacente à linha da árvore, que forma mais alta relação ao centro (Figura 3). Por exemplo, o estoque de C a uma profundidade de 1,0 m foi de 62 e 60 Mg ha^{-1} a 0 e 2 m de distância da linha da árvore em comparação com 55 Mg ha^{-1} a uma distância de 4 m do eucalipto, porém sem diferença significativa (Figura 3).

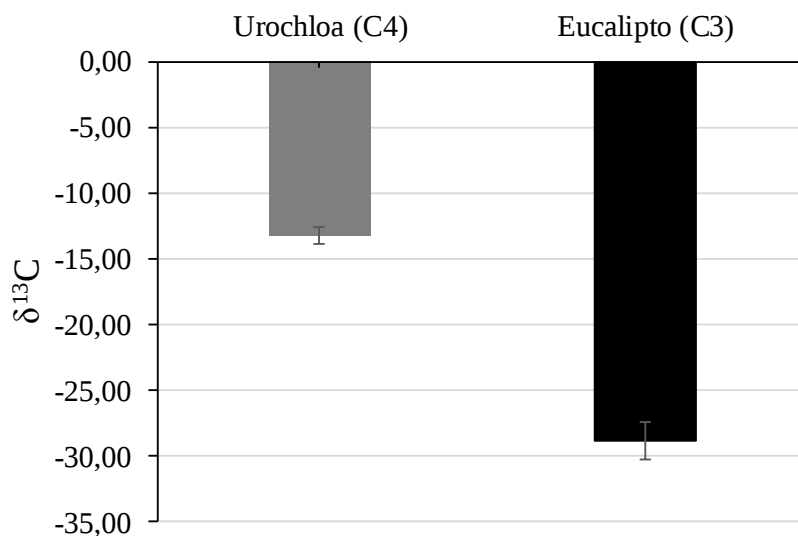
Figura 3 - Estoque de C total no solo em sistema integrado de produção e na pastagem a pleno sol acumulado até 1 m de profundidade (n=6). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade



Dinâmica do solo $\delta^{13}\text{C}$ e partição C3/C4

O material vegetal de eucalipto apresentou valor de abundância do $\delta^{13}\text{C}$ -28,86 ‰, enquanto que o tecido vegetal das gramíneas apresentou valor de -13,25 ‰ (Figura 4). Nossos resultados foram consistentes com os relatados na literatura em que o metabolismo fotossintético de plantas de ciclo C_3 exibem valores isotópicos mais baixos ($\delta^{13}\text{C}$), variando de -20,0 a -32,0 ‰, com uma média -27,0 ‰, enquanto espécies C_4 apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ maiores, variando de -9,0 ‰ a -17,0 ‰, com uma média de -13,0 ‰ (O'Leary, 1998; Boutton, 1991).

Figura 4 - Razão isotópica do $\delta^{13}\text{C}$ da *U. brizantha* e do Eucalipto sistema integrado de produção e na pastagem a pleno sol (n=6)



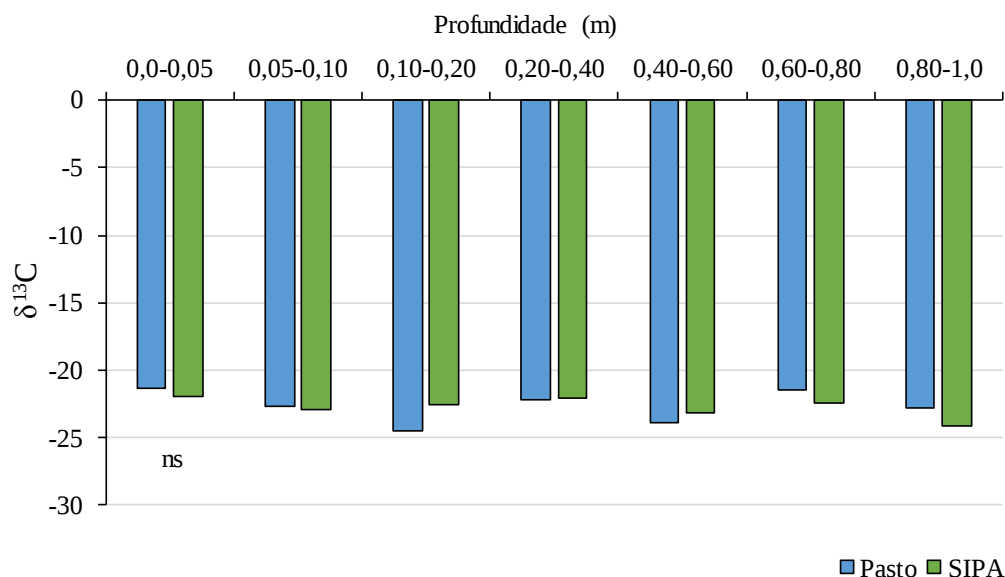
Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo não diferiram significativamente quanto aos eucaliptos, nem quanto à distância do eucalipto (Tabela 3). Quando comparado o SIPA coma pastagem não houve diferença nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo, em todas as profundidades (Figura 5). Não se observou mudança nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo, assim não se pode distinguir a contribuição dos resíduos de plantas C_3 e C_4 no solo, no caso do eucalipto (C_3) com valores mais próximos a -27,0 ‰, no sistema integrado de produção, e para a *U. brizantha* valores mais próximos a -13,25 ‰. Antes do início da implantação do sistema integrado, a área era composta por pastagem degradada com 10 anos de implantação. O $\delta^{13}\text{C}$ do solo reduziu com a inserção do eucalipto na pastagem, indicando a contribuição do eucalipto para a MOS em todas as profundidades estudadas (Figura 5).

Tabela 3 - Valores de $\delta^{13}\text{C}$ em sistema integrado de produção e pasto a pleno sol (n=3)

	$\delta^{13}\text{C}$		Médias
	<i>E. urograndis</i>	<i>E. grancam</i>	
	‰		
0-0,05 m			
0 m	-21,41a	-20,60a	-21,00a
2 m	-23,06a	-22,76a	-22,91a
4 m	-21,14a	-21,52a	-21,33a
6 m	-22,02a	-22,52a	-22,27a
Pasto	-18,78a	-18,78a	-18,78a
0,05-0,10 m			
0 m	-20,79a	-23,34a	-22,07a
2 m	-21,87a	-21,00a	-21,44a
4 m	-24,97a	-25,67a	-25,32a
6 m	-21,81a	-21,72a	-21,77a
Pasto	-20,62a	-20,62a	-20,62a
0,10-0,20 m			
0 m	-21,24a	-23,37a	-22,31a
2 m	-21,51a	-20,69a	-21,10a
4 m	-23,89a	-24,36a	-24,13a
6 m	-25,42a	-22,13a	-23,78a
Pasto	-20,88a	-20,88a	-20,88a
0,20-0,40 m			
0 m	-21,86a	-21,34a	-21,60a
2 m	-24,48a	-22,21a	-23,35a
4 m	-24,85a	-21,06a	-22,96a
6 m	-21,98a	-21,33a	-21,65a
Pasto	-19,33a	-19,33	-19,33a
0,40-0,60 m			
0 m	-21,23a	-22,06a	-21,65a
2 m	-22,82a	-20,19a	-21,51a
4 m	-24,59a	-22,22a	-23,41a
6 m	-23,16a	-23,55a	-23,36a
Pasto	-21,46a	-21,46a	-21,46a
0,60-0,80 m			
0 m	-23,26a	-25,44a	-24,35a
2 m	-21,73a	-20,46a	-21,09a
4 m	-23,21a	-27,28a	-25,25a
6 m	-24,47a	-22,04a	-23,26a
Pasto	-21,50a	-21,50a	-21,50a
0,80-1,0 m			
0 m	-23,46a	-22,31a	-22,89a
2 m	-24,48a	-22,16a	-23,32a
4 m	-26,73a	-24,16a	-25,45a
6 m	-25,98a	-24,27a	-25,13a
Pasto	-22,78a	-22,78a	-22,78a

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade

Figura 5 - Abundância isotópica de ^{13}C em sistema integrado de produção e pasto a pleno sol (n=6). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade.



2.4 Discussão

O estoque de C no solo a 0-0,20 m de profundidade foi maior na área de pastagem a pleno sol em relação ao sistema integrado de eucalipto e *U. brizantha*. Por outro lado, nas camadas mais profundas do solo, 0,60-0,80 e 0,80-1,0 m, maior estoque de C no solo foram obtidas próximo ao eucalipto (Figura 2). Nair et al., 2010, também observaram maiores estoques de C no solo próximo as árvores, em relação a maiores distâncias principalmente em camadas mais profundas do solo em sistemas agrícolas integrados com árvores. As gramíneas contribuem mais nas camadas superficiais e as árvores de eucalipto em profundidades maiores para os estoques de C do solo.

Quanto as distâncias do eucalipto não houve efeito significativo no estoque de C no solo em sistema integrado de produção agropecuária após seis anos de implantação no perfil do solo até 1 m de profundidade. Segundo Oelbermann et al. (2005) a entrada de matéria orgânica em sistema integrado em região tropical é maior em relação a regiões temperadas, no entanto o estoque de C resultante é relativamente semelhante a um local temperado de idade similar no Canadá. Young (1997) sugeriu que, em ambientes tropicais, pelo menos 10 anos são necessários antes que alteração nos níveis de C possa ser observado. Em solos de pastagens degradadas do Brasil, o cultivo de eucalipto de curta rotação (7 a 8 anos)

(Leite et al., 2010) e o aumento do tempo de cultivo (Lima et al., 2006) têm aumentado os estoques de C no solo.

O estoque total de C no solo até 1 m de profundidade também não foi afetado pela inserção do eucalipto na área de pastagem após seis anos de implantação. Voroney & Angers (1995), também sugeriram que os efeitos do manejo do C a curto prazo em sistemas temperados geralmente não são facilmente detectados por causa da alta variabilidade dentro do campo. Além disso, as mudanças no C são difíceis de prever devido a uma grande variedade de combinações de cultivo e práticas de manejo em associação com a complexidade dos constituintes do C e sua importância relativa em vários solos, climas e o tipo de cultura cultivada (Voroney & Angers, 1995). Solos com textura arenosa também podem conferir menor proteção física aos complexos organominerais e contribuir substancialmente para a exposição da matéria orgânica do solo à decomposição microbiana, aumentando a taxa de ciclagem de C orgânico no solo, dificultando assim o acúmulo de C no solo.

Solos de clima tropical cultivados com florestas apresentam grande potencial de estocagem de C assim como pastagens bem manejadas por serem considerados sistemas conservacionistas. Silver et al (2000), verificaram em revisão uma taxa de acúmulo de C em solos reflorestados sobre pastagem de $0,41 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ num período de 100 anos. Batjes (2005), ao avaliar os estoques de C nos principais solos do Brasil, encontrou variações de 42 Mg ha^{-1} para Neossolos Quartzarênicos a 137 Mg ha^{-1} para Gleissolos na camada de 0-1,0 m de profundidade do solo, o estoque de C no solo observado neste estudo está dentro dos resultados obtidos por esse autor.

O valor na abundância do $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo não foi influenciado pelos eucaliptos, nem pela distância do eucalipto após seis anos de implantação do sistema integrado. Não foram obtidos menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo em sistema integrado com eucalipto (C_3), o que seria o reflexo da contribuição do eucalipto ($-28,86\%$) para a matéria orgânica do solo, como se esperava. Assim não se conseguiu discriminar a conversão da matéria orgânica do solo provenientes da inserção do eucalipto (C_3) no sistema integrado de produção agropecuária após seis anos de implantação. Pulrolnik et al., 2009, ao estudarem a substituição da vegetação nativa (Cerrado) por florestas de eucalipto verificaram que a contribuição do C derivado do eucalipto para a MOS, após 20 anos de cultivo, foi de 5 %, indicando uma baixa taxa de substituição do C nativo pelo C derivado do eucalipto, com uma média anual de 0,25 %. Há pouca informação disponíveis sobre a

taxa de substituição do C em sistemas integrados de produção, mas os dados indicam que as alterações não são tão rápidas.

Shang e Tiessen (2000), estudaram um sistema com *Sorghum bicolor* L. (C₄) no Brasil, observaram uma mudança na abundância do $\delta^{13}\text{C}$ do solo. Neste estudo, o C tornou-se enriquecido com C₄, com mudança de -26,5 para -23,5 ‰ após 12 anos de implantação do sorgo. Outros estudos, por exemplo, Balesdent & Mariotti, 1996; O'Leary, 1998; Shang, & Tiessen, 2000; Yoneyama, 2001; Oelbermann, & Voroney. 2007 observaram mudanças semelhantes, como enriquecimento ou depleção no $\delta^{13}\text{C}$ do C ao mudar de uma cultura C₃ a C₄ ou vice-versa. Lima et al. (2006) observaram, em cultivo do eucalipto por 32 anos (quatro rotações), taxas médias anuais de substituição do C da ordem de 0,43, 0,40 e 0,20% para as camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade, respectivamente, em Latossolo com textura argilosa.

Embora exista pouca informação em regiões tropicais sobre a utilização de sistemas integrados de produção agropecuária no sequestro de solo C, os resultados deste estudo mostraram que esses sistemas integrados têm o potencial de manter os estoques de C no solo da mesma forma que pastagens bem manejadas. No entanto, o processo de sequestrar C no solo é lento. Assim recomenda-se que sejam realizados estudos adicionais em que as mudanças no SOC devem ser monitoradas a longo prazo.

2.5 Conclusões

1. Após seis anos de implantação do sistema integrado, os estoques de C variaram de 62 a 65 Mg ha⁻¹, não diferindo entre os eucaliptos, e nem quanto às distâncias do eucalipto, o sistema integrado de produção manteve os estoques de C na condição inicial (66 Mg ha⁻¹).

2. Os estoques de C foram maiores na pastagem que no sistema integrado de produção agropecuária apenas na camada superficial do solo, 0-0,20 m de profundidade.

3. A inserção do eucalipto na pastagem não alterou o $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo seis anos após a implantação do sistema integrado.

2.6 Agradecimentos

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento pessoal de Nível Superior). À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de doutorado e financiamento das pesquisas Processos nº 2014/10656-3 e 2016/14323-4.

Referências

- Alvares, CA, Stape, JL, Sentelhas, PC, Gonçalves, JLdeM, Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. **22**: 711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Albrecht, A, Kandji, ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **99**: 15–27. DOI: 10.1016/S0167-8809(03)00138-5
- Balesdent, J, Mariotti, A. (1996). Measurement of soil organic matter turnover using ^{13}C natural abundance. In: Boutton, T.W., Yamazaki, S. (Eds.) *Mass Spectrometry of Soils*. Marcel Dekker, New York, pp. 83–111.
- Batjes, NH. 2005. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. *Soil Use and Management* **21**(1): 22-24. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2005.tb00102.x
- Boutton, TW. 1991. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ fractionation and its utility in terrestrial plant studies. In: Coleman, D. C.; Fry, B. Carbon isotope techniques. San Diego: Academic, p.200.
- Dawson, TD, Mambelli, S, Plamboek, AH, Templer, TH, Tu, KP.2002. Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **33**: 507–559. DOI:10.1146/annurev.ecolsys.33.020602.095451
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. 2013. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3th Edition Brasília: Embrapa, 353 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. 2nd Edition Rio de Janeiro, 212 p.
- Ferreira, DF. 2011 Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia* **35**: 1039-1042. DOI: 10.1590/S1413-70542011000600001
- Forrester, DI, Bauhus, J, Cowie, AL, Vanclay, JK. 2006. Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: A review. *Forest Ecology and Management* **233**: 211-230. DOI:10.1016/j.foreco.2006.05.012.

- Golchin, A, Oades, JM, Skjemstad, JO, Clarke, P. 1995. Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by ^{13}C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state ^{13}C NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture. *Australian Journal of Soil Research* **33**: 59-76. DOI:10.1071/SR9950059
- Leite, FP, Silva, IR, Novais, RF, Barros, NF, Neves, J.L. 2010. Alterations of soil chemical properties by eucalyptus cultivation in five regions in the Rio Doce Valley. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **34**: 821-831. DOI: 10.1590/S0100-06832010000300024
- Lima, AMN, Silva, IR, Neves, JCL, Novais, RF, Barros, NF, Mendonca, ES, Smyth, TJ, Moreira, MS, Leite, FP. 2006. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* **235** (1-3): 219-231. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.08.331
- Nair, PKR. 2013. Agroforestry: Trees in Support of Sustainable Agriculture. In: Elias SA, Marshall S, Goldstein M et al (eds) *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier, London, pp 33–44.
- Nair, PKR, Nair, VD, Kumar, BM, Showalter, JM. 2010. Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. *Advances in Agronomy* **108**: 237–307. DOI:10.1016/S0065-2113(10)08005-3
- O'Leary, M. 1988. Carbon isotopes in photosynthesis. *Bioscience* **38**: 328–336. DOI: 10.2307/1310735
- Oelbermann, M, Voroney, RP, Kass, DCL, Schlönvoigt, AM. 2005. Above and belowground inputs in 19-, 10- and 4-year-old Costa Rican alley cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **105**: 163–172. DOI: 10.1016/j.agee.2004.04.006
- Oelbermann, M, Voroney. R.P. 2007. Carbon and nitrogen in a temperate agroforestry system: using stable isotopes as a tool to understand soil dynamics. *Ecological Engineering* **29**: 342-349. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2006.09.014
- Pulrolnik, K, Barros, N Fde, Silva, I.R, Novais, RF, Brandani, CB. 2009. 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* **33**(5): 1125-1136. DOI: 10.1590/S0100-06832009000500006
- Raij, BVan, Quaggio, JA. 1983. *Métodos de análise de solo para fins de fertilidade*. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas. 170p. (Boletim Técnico, 81).
- Severo, FF, Aita, NT, Marques, LG, Silva, LSda. 2017. Isotopic abundance of ^{13}C and contribution of eucalyptus biomass to soil organic matter conversion. *Ciência Rural* **47**(4). DOI: 10.1590/0103-8478cr20150900

- Shang, C, Tiessen, H. 2000. Carbon turnover and carbon-13 natural abundance in organo-mineral fractions of a tropical dry forest soil under cultivation. *Soil Science Society of America Journal* **64**: 2149–2155. DOI: 10.2136/sssaj2000.6462149x
- Silver, W L, Ostertag, R, Lugo, AE. 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. *Restoration ecology* **8**(4): 394-407. DOI: 10.1046/j.1526-100x.2000.80054.x
- Staff, SS. 2014. *Keys to soil taxonomy*. 12th Edition. Edn., Washington, DC.: USDA–Natural Resources Conservation Service.
- Tonucci, RG, Nair, VD, Ramachandran Nair, PK, Garcia, R. 2017. Grass vs. tree origin of soil organic carbon under different land-use systems in the Brazilian Cerrado. *Plant Soil* **419**: 281-292. DOI: 10.1007/s11104-017-3347-1
- Voroney, RP, Angers, DA. 1995. Analysis of the short-term effects of management on soil organic matter using the CENTURY model. In: Lal, R, Kimble, J, Levine, E, Stewart, BA. (Eds.), *Soil Management and Greenhouse Effect*. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 113–119.
- Kittur, BH, Sudhakara, K, Kumar, BM, Kunhamu, TK, Sureshkumar, P. 2015. Bamboo based agroforestry systems in Kerala, India: performance of turmeric (*Curcuma longa* L.) in the subcanopy of differentially spaced seven yearold bamboo stand. *Agroforestry System* **90**(2): 237–250. DOI: 10.1007/s10457-015-9849-z
- Young, A. 1997. *Agroforestry for Soil Management*. Wallingford: CAB International, Wallingford, U.K, p. 297.
- Yoneyama, T, Nakanishi, Y, Morita, A, Liyanage, BC. 2001. $\delta^{13}\text{C}$ values of organic carbon in cropland and forest soils in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* **47**: 17–26. DOI: 10.1080/00380768.2001.10408364
- Zomer, RJ, Neufeldt, H, Xu, J, Ahrends, A, Bossio, D, Trabucco, A, Noordwijk, M. van, & Wang, M. 2016. Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Scientific Reports* **6**: 29987. DOI:10.1038/srep29987

CAPÍTULO 3

Atividade microbiológica do solo em sistema integrado de produção agropecuária

RESUMO

O sequestro de carbono no solo é uma opção viável a curto prazo para mitigar o aumento do CO₂ atmosférico. Na agricultura, estratégias para aumentar o estoque de carbono no solo incluem o plantio direto, culturas de cobertura, rotação de culturas e sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA). O objetivo deste estudo foi investigar a influência da inserção de eucalipto em área de pastagem sobre os estoques de C e N, agregação de solo, atividades enzimáticas e microbiológicas em um Argissolo. O SIPA era composto por dois eucaliptos: *E. grancam* e *E. urograndis*, integrados com a forragem [*Urochloa brizantha* (Hochst. Ex A. Rich.) R. Webster 'Marandu'], com oito anos de implantação em região tropical. Parcelas de pastagem a pleno sol e de Cerrado nativo foram utilizados como referência. O SIPA mostrou estratificação da umidade do solo, com menor umidade do solo próximo à linha de plantio de eucalipto. Oito anos após a inserção do eucalipto na pastagem, na linha de plantio do eucalipto (0 m) e na pastagem a pleno sol os estoques de C e N foram semelhantes a vegetação nativa (Cerrado), mostrando o potencial do sistema integrado e da pastagem para conservar os estoques de C e N, com incremento das atividades enzimática extracelulares do solo. No entanto, a distribuição dos agregados do solo foi semelhante no sistema integrado, na pastagem e na vegetação nativa (Cerrado). A comunidade microbiana do solo não é afetada pela introdução do eucalipto no sistema, mas é maior na vegetação nativa Cerrado.

Palavras-chave: Ácidos graxos fosfolipídios; biomassa microbiana; atividade da enzima extracelular; agroflorestal; sistemas silvipastoril

Soil microbial activity in tropical integrated crop–livestock system

ABSTRACT

Soil carbon sequestration is a viable short-term option to mitigate increased atmospheric CO₂. In agriculture, strategies to increase the soil carbon (C) sink include no-tillage, cover crops, improved crop rotation, and integrated crop–livestock systems (ICLS). The objective of this study was to investigate the influence of the insertion of eucalyptus trees in a pasture on C and N stocks, soil aggregation, enzymatic and microbiological activities in an Argisol. The integrated crop–livestock system was composed of two eucalyptus: *E. grandis* and *E. urograndis*, integrated with the forage [*Urochloa brizantha* (Hochst. Ex A. Rich.) R. Webster 'Marandu'], with eight years of deployment in a tropical region. A grassland and the native forest Cerrado was included for comparison. The ICLS showed stratification of soil moisture, with lower soil moisture near the eucalyptus plantation line. After eight years of insertion of the eucalyptus in the pasture, the eucalyptus plantation line (0 m) and in the pasture presented C and N stocks similar to the native Cerrado, showing the potential of the integrated system and the pasture to conserve C and N stocks, with an increase in the extracellular enzymatic activities of the soil. However, the distribution of soil aggregates was similar in the integrated system, in pasture and in native vegetation (Cerrado). The microbial community of the soil was not affected by the introduction of eucalyptus in the system but was higher in the native cerrado vegetation.

Keywords: Phospholipid fatty acid (PLFA); microbial biomass; Extracellular enzyme activities; Agroforestry; Silvopastoral system

3.1 Introdução

O sequestro C no solo é uma opção viável a curto prazo para mitigar o aumento do CO₂ atmosférico (Post et al. 2004; Caldeira et al., 2004; Smith et al. 2008; IPCC 2007). As complexas interações biológicas, químicas e físicas que resultam no sequestro de C precisam ser avaliadas, a fim de determinar estratégias para alterar ou aumentar a capacidade de sequestrar C (White e Rice 2009). Estratégias para aumentar o C do solo envolvem aumento de entradas C ou redução das saídas ou perdas. O aumento da entrada

de C no sistema inclui o uso de culturas de cobertura, rotação de culturas, plantio direto proporcionando menor perturbação do solo, além dos sistemas agroflorestais (SAF) (Paustian et al. 2000; West e Post 2002; Lal 2004; Post et al. 2004; Smith et al. 2008; Schoeneberger et al., 2012; Lisboa et al., 2014).

Sistemas silvopastoril, combinam árvores com forragem (pastagem ou feno) e produção de gado, recentemente ganhou destaque como abordagem ecologicamente sustentável e ambientalmente desejável para a gestão de pastagens degradadas (Haile et al., 2008). O manejo silvopastoril com plantações de árvores de rápido crescimento tem sido cada vez mais adotado no Cerrado Brasileiro (Tonucci et al., 2011). Já que o SAF foi aprovado no Protocolo de Quioto da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas como atividade de compensação de gases de efeito estufa, o potencial de armazenamento de C no solo em SAF é de especial importância, principalmente devido ao grande volume de biomassa acima do solo e sistemas radiculares profundos de árvores (Nair et al., 2009, Nair et al., 2010).

A inserção de árvores no sistema pode promover a diversidade microbiana ao converter pastagens em florestas de espécies exóticas (Carson et al., 2010). As plantas dependem de micro-organismos do solo para decompor a matéria orgânica e disponibilizar nutrientes às plantas. Mudanças na comunidade microbiana também podem afetar o desenvolvimento das plantas acima do solo (Frouz et al., 2016). A biologia do solo é um componente importante no sequestro de C e no processo de agregação de solo, uma vez que a abundância de fungos micorrizos arbusculares (AMF) e saprofíticos são frequentemente correlacionados a massa de macroagregados (Six et al., 2006). Práticas de manejo podem alterar a composição e a função das comunidades microbianas, afetando assim a dinâmica do C no solo. Bactérias e fungos desempenham um papel fundamental na decomposição da matéria orgânica (Six et al., 2006). Atividades enzimáticas são um indicador sensível da qualidade do solo e podem responder às mudanças no uso do solo mais rápido que outras propriedades (Medeiros et al., 2015). A biomassa microbiana pode aumentar com menor distúrbio do solo (Beare, 1997; Frey et al., 1999). O grau de perturbação, pH, umidade do solo e aporte de resíduos são fatores que controlam a proporção de biomassa bacteriana e fúngica em agroecossistemas (Six et al., 2006; White e Rice 2009).

A diversidade e atividade microbiana do solo em pastagens tropicais também estão relacionadas ao conteúdo carbono orgânico no solo (COS), bem como o conteúdo de N, P e nutrientes catiônicos (Lisboa et al., 2014; Waring et al., 2014). Pastagens e savanas

tendem a ter menor COS, biomassa microbiana, atividade microbiana e diversidade de micorrizas que as florestas (Öpik et al., 2006; Eaton e Chassot, 2012), e nas pastagens esses fatores microbianos também são influenciados pela intensidade do pastejo (Michelsen et al., 2004). Bactérias e fungos geralmente compreendem > 90% da biomassa microbiana total do solo, e são responsáveis pela maioria da decomposição da matéria orgânica do solo. Uma vez que as comunidades microbianas do solo são reguladoras fundamentais da dinâmica matéria orgânica do solo (MOS) e da disponibilidade de nutrientes, as mudanças na composição e função da comunidade microbiana (por exemplo, utilização do substrato), em resposta às diferentes práticas de manejo agrícola podem desempenhar um papel importante na determinação das taxas de perda de C do solo (Six et al., 2006).

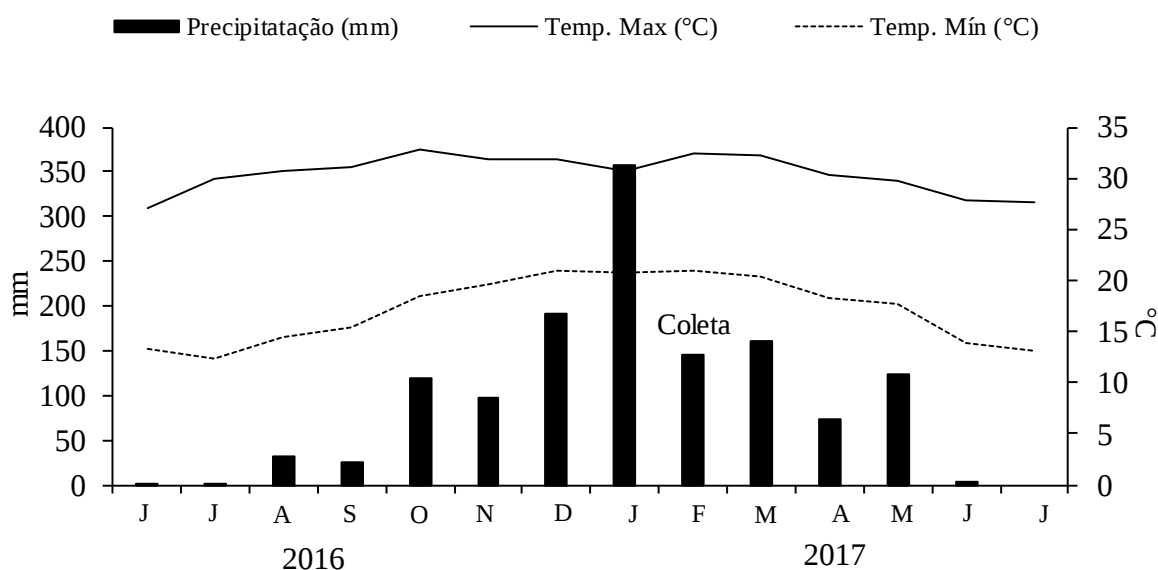
O bioma Cerrado (savana brasileira) cobre 204 milhões de hectares do território brasileiro e tornou-se uma das maiores fronteiras agrícolas do mundo (Mendes et al., 2012). A introdução do sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) pode alterar a dinâmica do C no solo, afetando a quantidade e a qualidade da MOS, agregação, populações microbianas e atividades de enzimas do solo. Estudos da saúde do solo considerando a atividade enzimática e a biomassa microbiana no SIPA em regiões tropicais são escassos. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência do sistema silvopastoril de eucalipto integrado com a pastagem sobre os estoques de C e N, agregação de solo, atividades de enzimas extracelulares e biomassa microbiana, em comparação com a pastagem a pleno sol e área nativa (Cerrado).

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Descrição do local

As amostragens foram realizadas em sistema integrado de produção agropecuária, instalado em 2009, no centro avançado de pesquisa tecnológica do agronegócio de seringueira e sistemas agroflorestais (APTA), localizado em Votuporanga, São Paulo, Brasil (50° 04 'W, 20° 28' S e 450 m). Área com relevo suave-ondulado e altitude de 410-490 m de seis hectares. De acordo com a classificação de Köppen, o clima é Cwa, tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso. As temperaturas máximas e mínimas médias anuais são 30 e 18 °C, respectivamente, com precipitação anual de 1100-1500 mm, os dados meteorológicos são apresentados na Figura 1.

Figura 1- Precipitação, temperatura máxima e mínima da área experimental em 2016-2017



Os atributos químicos do solo foram determinados (0-0,20 m) de acordo com a metodologia proposta por Van Raij et al., (2001) e físicos de acordo com a Embrapa (1997) mostrados na tabela 1. O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (Embrapa 2013) ou Arenic Hapludult (Soil Survey Staff, 2014).

Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas do Argissolo Vermelho-Amarelo de 0,0-0,20 m

Características do solo	Local		
	SIPA	Pastagem	Cerrado
pH	4,9	5,4	5,1
Argila (g kg ⁻¹)	82	73	68
Silte (g kg ⁻¹)	102	107	123
Areia (g kg ⁻¹)	816	820	809
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	18,0	22,7	26,0
P Resina (mg dm ⁻³)	3,91	3,78	4,1
H + Al (mmol _c kg ⁻¹)	29,0	18,3	26,6
Al ³⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	0,9	0,6	0,8
K ⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	1,31	2,13	2,40
Ca ²⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	10,7	11,7	8,33
Mg ²⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	13,9	10,0	5,0
CTC (mmol _c kg ⁻¹) [†]	54,9	42,1	42,3
Saturação por bases (%)	47,2	56,7	37,1
Ds (Mg m ⁻³) ^{††}	1,6	1,65	1,43
Textura	Arenosa	Arenosa	Arenosa

[†] CTC: capacidade de troca de cátions. ^{††}Ds: Densidade do solo

3.2.2 Histórico da área

O experimento foi implantado em uma pastagem degradada, com dez anos de implantação, de seis hectares, foi preparada de forma convencional, através de arações e gradagens, e aplicação de 2000 kg ha⁻¹ de calcário. Após preparo, semeou-se o milheto (*Pennisetum glaucum*), setembro de 2009. Em outubro de 2009, realizou-se fosfatagem a lanço, e o sulcamento para o plantio do eucalipto, em linha simples sobre os terraços, no espaçamento de 2 × 12 m, sentido leste-oeste acompanhando as curvas de nível, utilizando mudas de 3 meses de idade, e densidade de 370 plantas ha⁻¹.

Dois eucaliptos: *E. grancam* 1277 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*) e *E. urograndis* H-13 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), foram plantados em parcelas de aproximadamente 1 hectare, composta por duas linhas do mesmo eucalipto. No verão, safra 2009/10, foi semeado soja sobre a palhada do milheto em sistema plantio direto entre as linhas do eucalipto, e após semeou-se *C. juncea* na safrinha. No verão, safra 2010/11 semeou-se milho em consórcio com *U. brizantha* cv. Marandu, e após a colheita do milho o a forragem se estabeleceu na área dando início ao SIPA. Aos dois anos de idade do eucalipto integrado com a *U. brizantha*, foi realizado desbaste das árvores até 12 m de altura, desbastando-se 2/3 da copa, a fim de proporcionar maior luminosidade a forrageira. Anualmente, era feita adubação nitrogenada a lanço na pastagem, na dose de 200 kg ha⁻¹ de N (ureia), no início do período de maior precipitação (outubro). Em setembro de 2011, foram introduzidos na área, bovinos de corte (mestiços), com 28 meses recém-desmamados, em sistema de pastejo contínuo, com lotação de 2 UA ha⁻¹, mantidos até o momento do abate.

3.2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial de 2 × 4, com três repetições. Os tratamentos foram os dois eucaliptos: *E. Grancam* 1277 e *E. urograndis* H-13, e quatro distâncias da linha do eucalipto: 0,0; 2,0; 4,0 e 6,0 m. Além disso, uma pastagem a pleno sol e vegetação nativa (Cerrado) foram utilizadas como referências.

3.2.4 Umidade no solo

A umidade volumétrica do solo foi analisada por uma sonda de capacitância (modelo Diviner 2000®, Sentek Pty Ltd, Austrália), em fevereiro de 2017, na profundidade de 0,0-0,20 m.

3.2.5 Coleta das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas em fevereiro de 2017 (estação chuvosa), de 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, usando um cilindro de aço de 1,4 m de altura e diâmetro interno de 60 mm. As amostras foram refrigeradas a 4 °C e transportadas para o laboratório de ecologia e microbiologia do solo da Kansas State University, Manhattan Kansas, EUA. Sub amostras para propriedades físicas e químicas foram secados ao ar, moídos e peneirados através de malha de 2 mm à temperatura ambiente. Sub amostras para propriedades microbianas foram armazenamento a -20 ° C.

3.2.6 Estoque de C e N do solo

Os teores de C total (CT) e nitrogênio total (NT) foram determinados pelo método de combustão a seco (900 °C) usando analisador elementar CN (Flash EA 1112 Series Thermo Finnigan Italia SpA, MI, Itália) em amostras de solo que foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm, e moídas em cadinho de porcelana. O estoque de C e N do solo foram calculados a partir da concentração por unidade de massa, densidade do solo e profundidade amostrada. Os estoques de C e N do solo foram estimados por meio da seguinte equação:

$$C = CO \times Ds \times E$$

Em que: C é o estoque de C na camada de solo ($Mg\ ha^{-1}$), CO é o teor de C total na camada de solo (%), Ds é a densidade do solo na camada de solo ($Mg\ m^{-3}$) e E é a espessura da camada amostrada (cm).

3.2.7 Distribuição dos agregados

Os agregados estáveis em água foram separados usando um método de peneira úmida descrito por Yoder (1936) com modificações de Mikha e Rice (2004). O solo foi seco ao ar e colocados (50 g) no topo das peneiras. Água foi rapidamente adicionada até o solo ser coberto. O solo foi submerso em água durante 10 minutos seguindo por 10 minutos

de peneiramento úmido. Quatro classes de tamanho de agregados foram coletadas de cada tratamento > 4,0-8,0 > 2,0-4,0 > 0,5-2,0 e <0,125 mm de diâmetro.

3.2.8 Atividade de enzimas extracelulares

Os ensaios de enzima hidrolítica (hidrolase) incluem enzimas que requerem C (β -glucosidase, β G, EC 3.2.1.21), enzima que requer P (fosfatase ácida, AP, EC 3.1.3.2) e enzima que requer N (N-acetil- glucosaminidase, NAG, EC 3.2.1.52). Dois motivos principais para selecionar essas três enzimas. Primeiro, elas controlam a taxa de ciclagem de nutrientes no solo. As atividades potenciais dessas enzimas são frequentemente ligadas ao metabolismo microbiano e utilizadas como indicadores da demanda microbiana por nutrientes (Sinsabaugh et al., 2009). As potenciais atividades de β G, NAG, AP também foram utilizadas como indicadores das enzimas que requerem C, N e P em estudos de estequiometria do solo em escala global (Sinsabaugh et al., 2008) e regional (Waring et al., 2013). Em segundo lugar, são as enzimas dominantes do solo.

As atividades potenciais das hidrolases foram medidas seguindo método fluorométrico modificado usando substratos 4-metilumbelliferone (MUB) (Zeglin et al., 2013). Um grama de solo foi homogeneizado em 100 mL de tampão de acetato (50 mM) pH 5. A solução do solo foi adicionada em microplacas de 96 poços com substrato de fluorométrico de 200 μ M específico para cada enzima. Cada amostra tinha seis repetições analíticas. Além disso, foram medidos os valores do branco. O tempo de incubação específico para cada enzima foi obtido em ensaios preliminares, determinou-se o tempo de maior atividade para cada enzima. O tempo em que a solução parada NaOH 0,5 N foi adicionada em ensaios de atividade de hidrolases foram registrados como tempos de parada. A absorbância fluorescente foi determinada por um leitor de microplacas multi-leitor (FilterMax F5, Molecular Devices, EUA) com excitação/emissão de 365/450 nm. As atividades enzimáticas foram relatadas como nano moles por hora por grama de solo (nmol hr⁻¹ solo).

3.2.9 Atividade microbiana do solo

Os ácidos graxos fosfolipídios (PLFA) foram determinados com a modificação do método Blight e Dyer (1959) (White e Ringelberg, 1998). Os lipídios foram extraídos em solução tampão de clorofórmio: metanol: fosfato (Blight e Dyer, 1959), de 5 g de solo liofilizado durante 2 horas. Os extratos lipídicos totais foram separados em lipídios neutros, lipídios polares e glicolipídeos usando colunas de extração de sílica gel pré-condicionadas

(J. T. Baker, Phillipsburg, NJ, EUA). As amostras foram analisadas por cromatografia gasosa (HP 6890, Agilent Incorporated, Palo Alto, CA, EUA). Os picos das amostras foram quantificados com base na comparação da abundância com um éster de ácido metílico não decanóico padrão interno (19: 0) e os valores expressos em nmol PLFA por g⁻¹ de solo.

Os ácidos graxos foram agrupados em bactérias gram-positivas (i15: 0, a15: 0, 10Me16: 0, i17: 0 e a17: 0), bactérias gram-negativas (18: 1x7c e 19: 0 cíclico), actinomicetos (10Me18: 0 e 10Me17: 0), e fungos (18: 2x6,9c e 18: 1x9c) (McKinley et al., 2005; Fabrizzi et al., 2009). As relações fungos: bactérias foram calculadas dividindo a soma dos biomarcadores de fungos e AMF pela soma de bactérias Gram-positivas, bactérias gram-negativas e actinomicetos. A biomassa microbiana total (MB) por PLFA foi determinada com a soma de todos os indicadores de bactérias, actinomicetos e fungos identificados.

3.2.10 Análise estatística

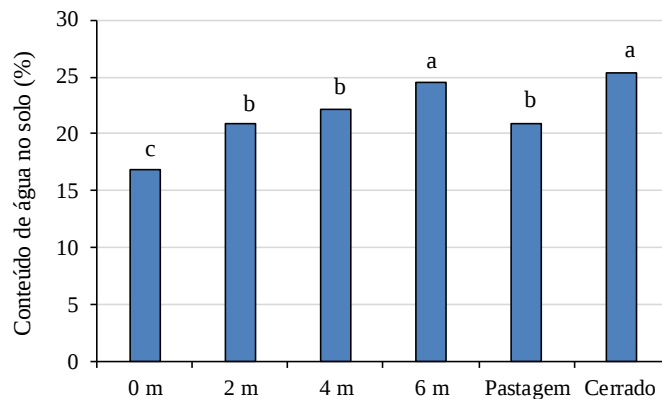
Os dados foram verificados quanto a pressuposição da análise de variância. Quando atendidos os requisitos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F 5% ($p < 0,05$), os dados foram analisados no programa estatístico Sisvar® 5.6 (Ferreira, 2011). As médias comparadas pelo teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

3.3 Resultados

3.3.1 Conteúdo volumétrico de água no solo

A umidade volumétrica do solo foi menor próximo a linha do eucalipto 16,8 % (0 m), e aumentou com a distância da linha da árvore para 20,8 % (2 m), 22,2 % (4 m), maior valor aos 24,5 % aos 6 m de distâncias do eucalipto (Figura 2). O sistema integrado apresentou maior umidade do solo a 6 m de eucalipto, semelhantemente à vegetação nativa (Cerrado), e menor umidade na linha do eucalipto (0 m) em comparação com a pastagem a pleno sol. Portanto, houve estratificação da umidade do solo no SIPA (Figura 2) mesmo nos meses de maior precipitação no ano (Figura 1).

Figura 2 - Conteúdo volumétrico de água no solo em sistema integrado, pastagem e floresta nativa Cerrado, na profundidade de 0,0-0,2, em fevereiro de 2017 (n=6). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade.



3.3.2 Estoques de C e N

Os estoques de C e N foram maiores na vegetação nativa (Cerrado) na camada superficial (0-0,05 m), mas sem diferir da pastagem a pleno sol e do sistema integrado na linha das árvores (0 m) (Figura 3). Os estoques C e N no SIPA à 2; 4 e 6 m do eucalipto foram menores que a vegetação nativa (Cerrado), mas não diferiram da pastagem a pleno sol. Nas profundidades de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, não houve diferença nos estoques de C e N entre o sistema integrado de produção, a pastagem a pleno sol e a mata nativa (Cerrado) (Figura 3). Os eucaliptos não diferiram quanto aos estoques de C e N nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (Figura 4).

Figura 3 - Estoque de carbono e nitrogênio do solo em sistema integrado, pastagem e floresta nativa Cerrado (n=6).

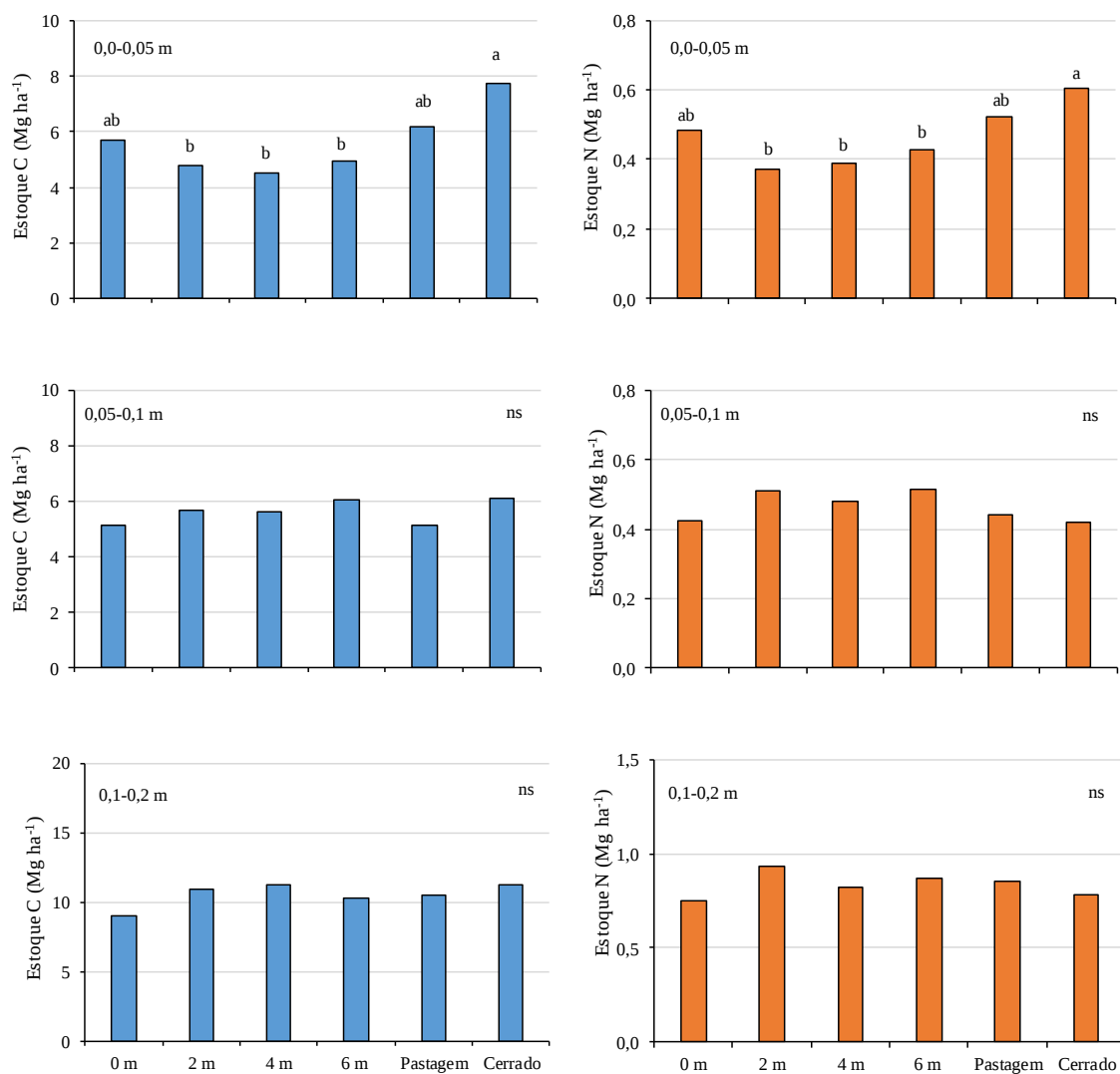
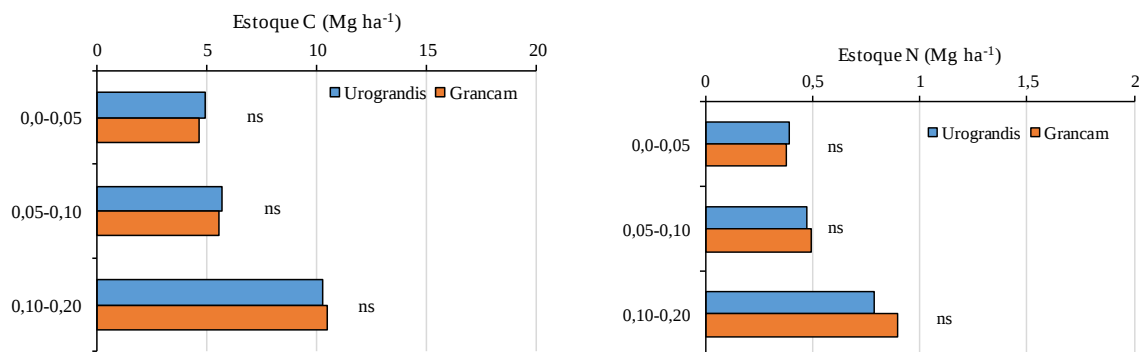
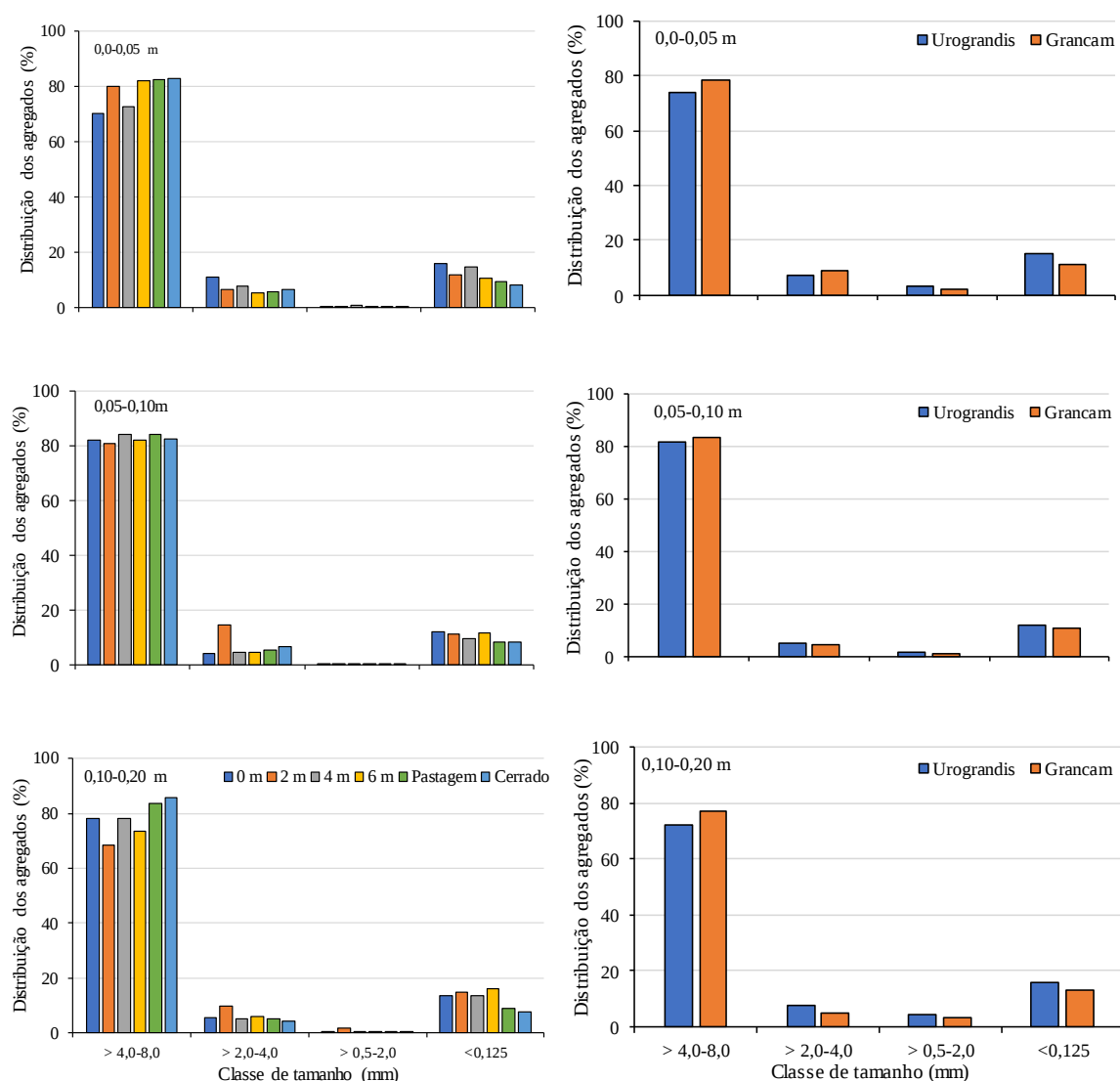


Figura 4 - Estoque de carbono e nitrogênio do solo em função dos eucaliptos (n=3)



3.3.3 Distribuição dos agregados

A distribuição do tamanho dos agregados do solo não foi afetada pela inserção do eucalipto na área de pastagem após oito anos de implantação do sistema (Figura 5). O sistema integrado, a pastagem e a vegetação nativa (Cerrado) apresentaram distribuições semelhantes de agregados do solo. Além disso, os eucaliptos também não influenciaram a distribuição agregados do solo nas profundidades de 0,0-0,20 m (Figura 5).

Figura 5 - Distribuição dos agregados do solo no sistema integrado, pastagem e Cerrado

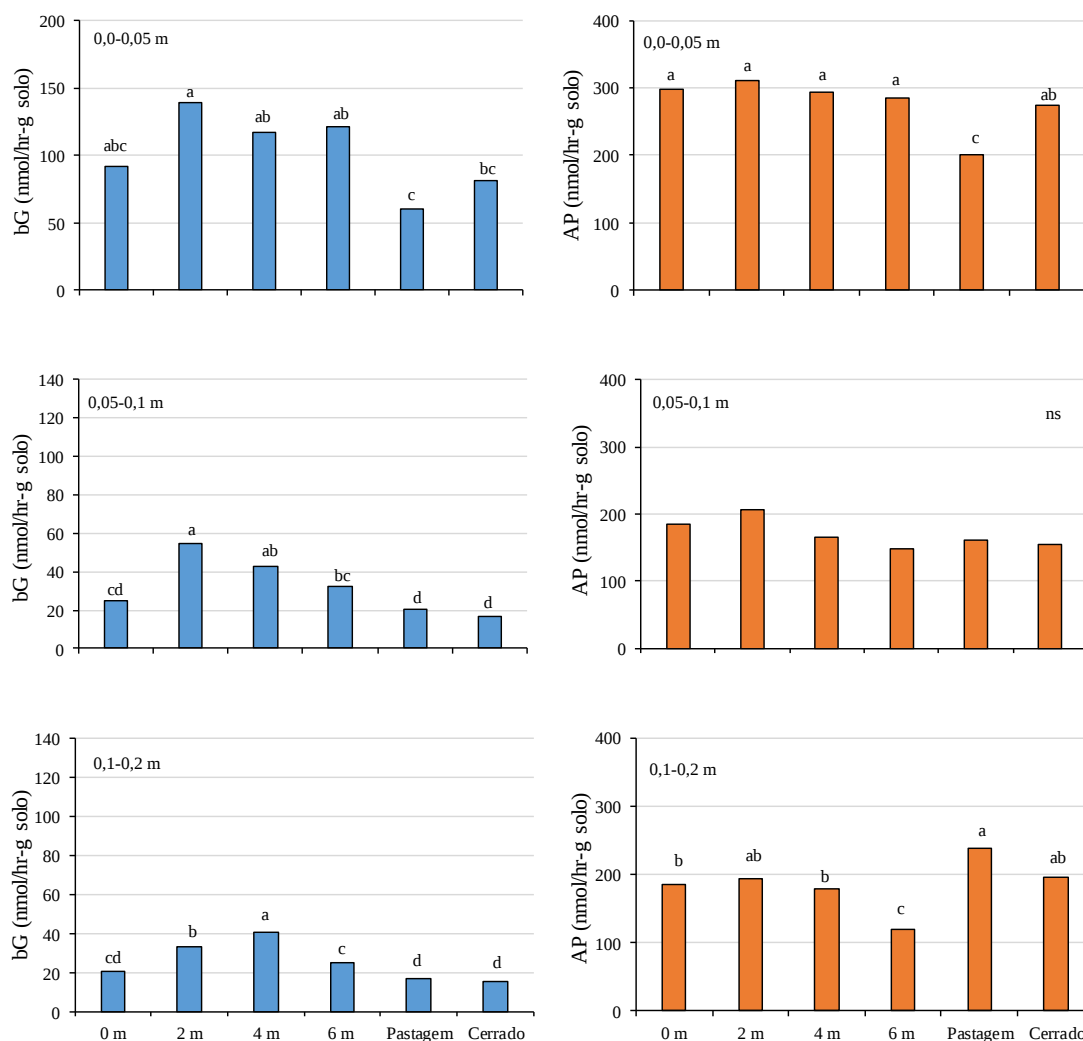
3.3.4 Atividade das enzimas extracelulares

Em geral, a atividade da enzima β -glucosidase no solo foi maior no sistema integrado de eucalipto e *U. brizantha*, em comparação com a pastagem a pleno sol e a vegetação nativa (Cerrado), nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (Figura 6). No entanto, nas profundidades de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, observou-se menor atividade da enzima β -glucosidase próximo à linha de plantio do eucalipto (0 m) em relação ao 2, 4 e 6 m distância das árvores (Figura 6). Na pastagem a pleno sol, na área nativa (Cerrado) e no sistema integrado (0 m) foram obtidos os valores mais baixos de β -glucosidase.

A atividade da enzima fosfatase ácida (AP) foi semelhante no sistema integrado e na vegetação nativa, e menor na pastagem na profundidade de 0-0,05 m (Figura 6). Não houve diferença na profundidade de 0,05-0,10 m. O sistema integrado a 2 m do eucalipto,

na pastagem e no Cerrado tiveram atividades similares da atividade da enzima fosfatase ácida em 0,10-0,20 m de profundidade, enquanto a menor atividade foi observada aos 6 m das árvores.

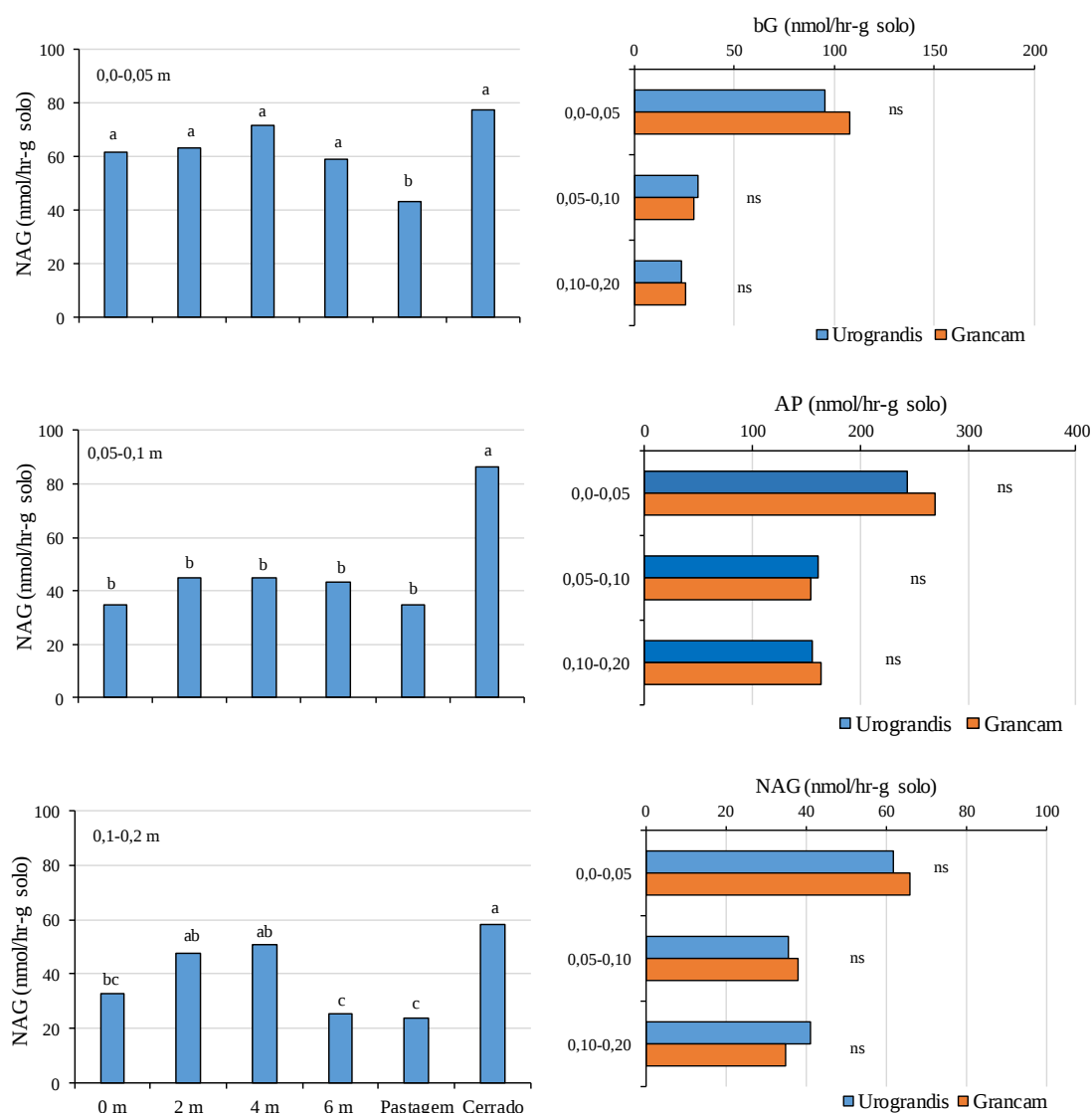
Figura 6 - Atividade da enzima extracelular do solo em sistema integrado, pastagem e Cerrado. bG: β -glucosidase; AP: fosfatase ácida (n=6)



A atividade da enzima N-acetil glucosidase (NAG) no solo foi maior na vegetação nativa (Cerrado), no entanto não diferiu do sistema integrado de produção até 4 m da linha do eucalipto n profundidade de 0-0,05 m (Figura 7). O sistema integrado de produção mostrou maior atividade de N-acetil glucosidase que a pastagem a pleno sol na camada superficial do solo (0-0,05 m). Na profundidade de 0-0,05 m, a maior atividade de N-acetil glucosidase foi observada na vegetação nativa (Cerrado), porém não diferiu do sistema integrado de produção agropecuária. Na profundidade de 0,10-0,20 m, a atividade da N-

acetil glucosidase sob vegetação nativa (Cerrado) foi maior, mas não diferiu do sistema integrado a 2 e 4 m do eucalipto (Figura 7). As atividades das enzimas β -glucosidase, fosfatase ácida e N-acetil glucosidase no solo não foram afetadas pelos eucaliptos (Figura 7).

Figura 7 - Atividade da enzima extracelular do solo em sistema integrado, pastagem e vegetação nativa Cerrado. NAG: N-acetil glucosidase. bG: β -glucosidase, AP: fosfatase ácida.

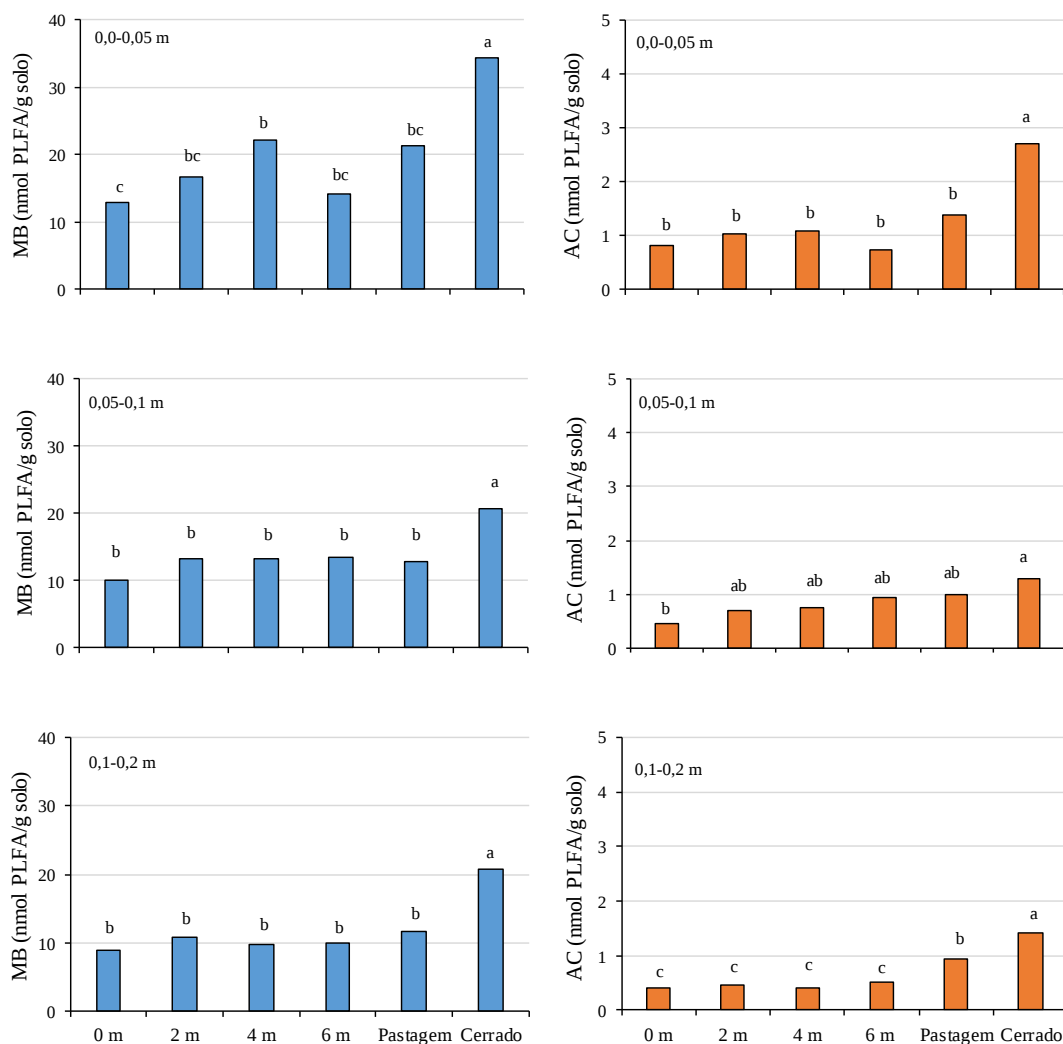


3.3.5 Biomassa microbiana do solo

A biomassa microbiana (MB) foi maior no Cerrado (34,3 nmol PLFA/g solo) em relação ao sistema integrado (16,4 nmol PLFA/g solo) e pastagem a pleno sol (21,3 nmol PLFA/g solo) na profundidade de 0-0,05 m (Figura 8). No sistema integrado de produção, a MB foi afetada pela distância da linha da árvore, menor na linha de eucalipto (12,8 nmol PLFA/g solo), aumentando com a distância até 4 m (22,1 nmol PLFA/g solo), na camada 0-0,05 m. Nas camadas mais profundas do solo, a MB foi maior no Cerrado (20,8 e 20,7 nmol PLFA/g solo), sendo que o sistema integrado (12,5 e 9,85 nmol PLFA/g solo) e a pastagem a pleno sol (12,8 e 11,6 nmol PLFA/g solo) não diferiram estatisticamente, nas profundidades de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente (Figura 8).

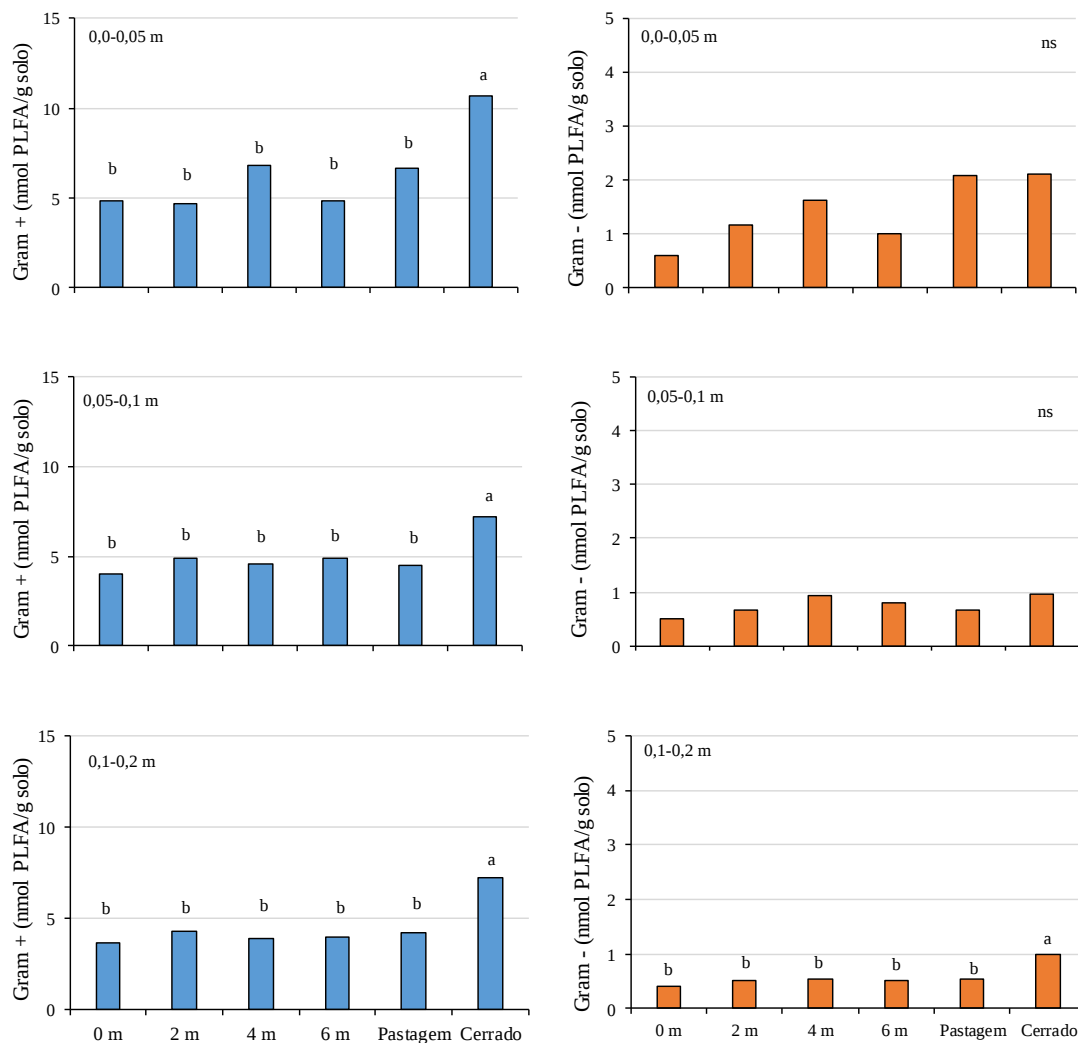
Maior população de actinomicetos (AC) no solo ocorreram na área nativa (2,7 nmol PLFA/g solo) em relação ao sistema integrado (0,92 nmol PLFA/g solo), e a pastagem a pleno sol (1,39 nmol PLFA/g solo) a 0-0,05 m (Figura 8). A inserção do eucalipto na área de pastagem não afetou a população de actinomicetos no solo na profundidade de 0-0,10 m, uma vez que as populações obtidas no sistema integrado não diferiram da pastagem a pleno sol. Na profundidade de 0,05-0,10 m, a comunidade de AC foi menor na linha de plantio do eucalipto (0 m). No entanto, a população de actinomicetos na camada de 0,10-0,2 m, foram maiores na área nativa (1,43 nmol PLFA/g solo), que na pastagem a pleno sol (0,95 nmol PLFA/g solo), e esta por sua vez maior que o sistema integrado de produção (0,46 PLFA/g solo) (Figura 8).

Figura 8 - Composição da comunidade microbiana do solo no sistema integrado, pastagem e vegetação nativa Cerrado. MB: biomassa microbiana; AC: Actinomicetos



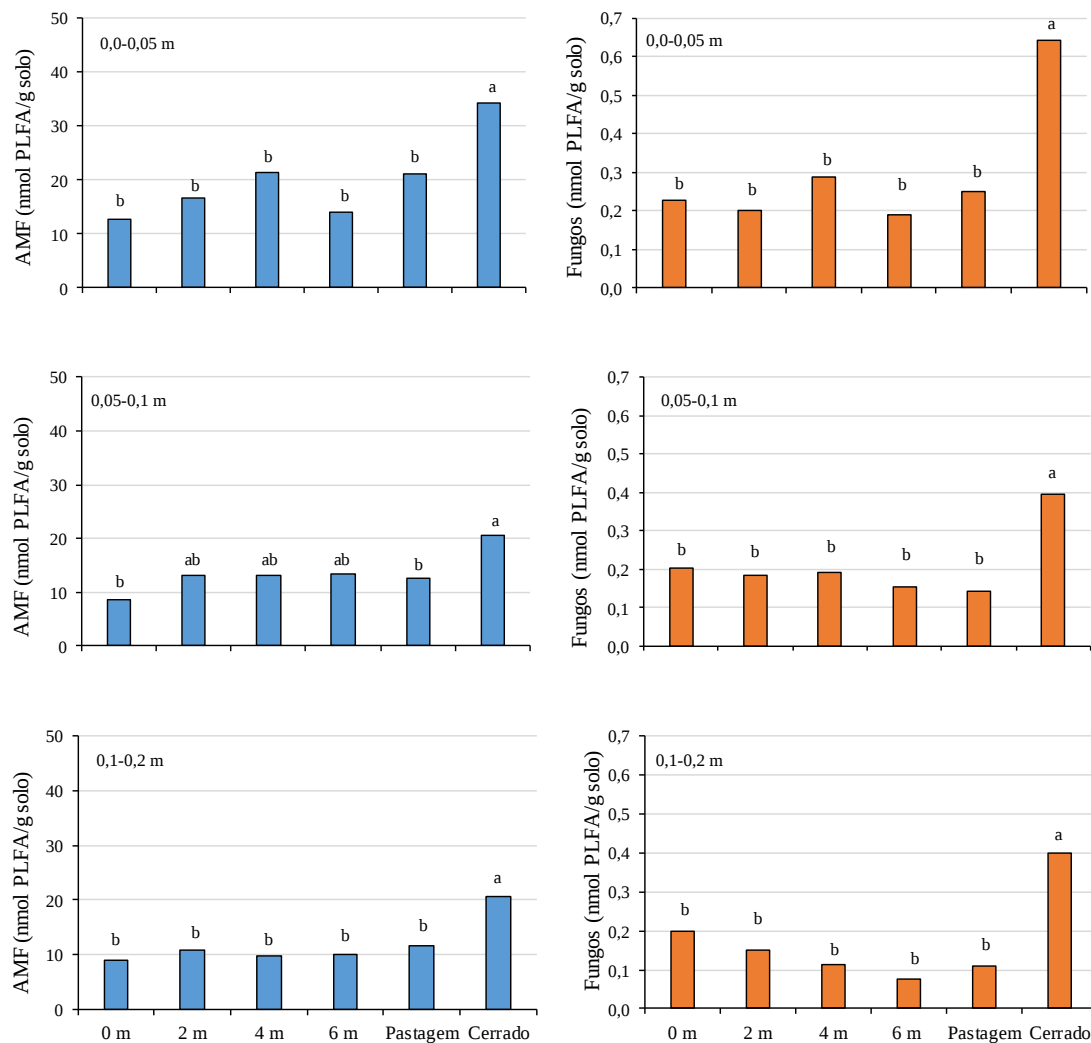
As comunidades de bactérias Gram-positivas (Gram +) do solo foi maior na vegetação nativa (Cerrado) em relação a pastagem a pleno sol e o sistema integrado de produção em todas as profundidades do solo (Figura 9). Além disso, a inserção de eucalipto em área de pastagem não afetou as bactérias Gram +, já que o sistema de produção integrado não diferiu da pastagem a pleno sol. Nenhuma diferença significativa foi observada nas bactérias Gram-negativas (Gram -) nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, mas a comunidade de bactéria Gram - foi maior na floresta nativa que no sistema integrado e pastagem na profundidade de 0,10-0,20 m. (Figura 9).

Figura 9 - Comunidade microbiana das bactérias Gram + e Gram - do solo em sistema integrado, pastagem e vegetação nativa Cerrado. Gram +: bactérias Gram-positivas; Gram -: bactérias gram-negativas.



Os fungos micorrízicos arbusculares (AMF) e fungos totais foram maiores na vegetação nativa (Cerrado) em relação ao sistema integrado em todas as profundidades analisadas 0-0,20 m. Da mesma forma que para biomassa microbiana, Actinomicetos, Gram + e Gram -, a inserção do eucalipto na área de pastagem em sistema integrado de produção não afetou os AMF e fungos totais em relação à pastagem (Figura 10).

Figura 10 - Composição da comunidade de micro-organismos do solo no sistema integrado, pastagem e vegetação nativa Cerrado. AMF: fungos micorrízicos arbusculares; Fungos: fungos do solo, exceto AMF.



3.4 Discussão

O sistema silvopastoril está sendo cada vez mais adotado no Cerrado Brasileiro (Tonucci et al., 2011), com o objetivo de aumentar o estoque de C no solo e restaurar sua fertilidade. Nossos resultados confirmaram maior estoque de C sob a linha de eucalipto (0 m) e na pastagem a pleno sol, após oito anos de cultivo integrado, assim como na área nativa Cerrado na camada superficial do solo (0-0,05 m). Nas camadas mais profundas do solo, 0,05-0,10 e 0,10-0,20, não houve diferença nos estoques de C e N, o sistema integrado com eucalipto não diferiu da pastagem e nem da vegetação nativa (Cerrado). Nossos

resultados confirmam o potencial do sistema integrado para aumentar ou pelo menos manter os estoques C e N no solo.

O acúmulo de C e compostos orgânicos sob o dossel de árvores pode ser explicado principalmente pelo fornecimento de matéria orgânica e exsudatos radiculares retornados ao solo, bem como pela lixiviação reduzida (López-Pintor et al., 2006). Pulrolnik et al., (2009), observaram maior teor de matéria seca da serapilheira na área de eucalipto quando comparado a vegetação nativa (Cerrado) e a pastagem. A serapilheira de eucalipto apresenta alta relação C/N, de 30 a 100, de acordo com a parte da planta estudada, e também alta relação C/P e C/S, o que contribui para lenta decomposição dos resíduos, contribuindo para os incrementos nos estoques de C e N, principalmente nas camadas mais superficiais. Resíduos da pastagem contêm compostos mais lábeis que os resíduos florestais, e estão associados a taxas de decomposição mais altas (Eclesia et al., 2012), resultando em altos estoques de C e altas densidades radiculares na camada superficial do solo, o que pode favorecer a formação de agregados e estabilização do C nos agregados do solo (Six et al., 2002).

Os maiores estoques de C no solo na vegetação nativa (Cerrado), semelhantemente a pastagem a pleno sol e o sistema integrado de produção (0 m) verificados na camada superficial 0-0,05 m, deve-se a situação mais estável dessas áreas, e baixo grau de antropização, onde os teores de MOS não apresentam grandes variações ao longo do tempo, à medida que as adições de C orgânico via resíduos vegetais e a sua conversão em MOS são da mesma magnitude que as perdas de C orgânico pela mineralização da MOS, promovidas pela atividade microbiana (Sanchez, 1976).

A umidade do solo foi significativamente influenciada pela distância do eucalipto no sistema integrado. A inserção do eucalipto na área de pastagem reduziu a umidade do solo como se esperava, principalmente perto das linhas das árvores.

A grande distribuição dos macroagregados (>4,0-8,0 mm) no solo na vegetação nativa (Cerrado), semelhantemente ao sistema integrado de produção e a pastagem a pleno sol pode ao fato de que as pastagens têm afetado a agregação do solo e isso tem sido atribuído ao crescimento e à atividade do sistema radicular das gramíneas (Liu et al., 2005). A ação mecânica devido a crescimento e funcionamento das raízes, microrganismos e da fauna do solo, que são estimuladas com a presença de pastagens, proporciona o agrupamento dos microagregados, resultando na formação de macroagregados do solo (Haynes e Beare, 1996). A estabilidade dos agregados nesses sistemas de manejo do solo é associada ao aporte de C via produção de matéria seca das culturas (Haynes e Beare, 1997)

e à presença de C no solo, que é importante constituinte dos agentes ligantes (Blair et al., 2006), bem como à maior atividade biológica no solo (Bronick e Lal, 2005).

Vallejo et al., (2012), ao investigarem o efeito do dossel das árvores de *Prosopis juliflora* em sistemas silvopastorais intensivos (3-15 anos), descobriram que apesar das mudanças nas propriedades físico-químicas provavelmente demorarem mais (>15 anos) para melhorar significativamente, a comunidade e atividade microbiana do solo pode ser vista como um indicador precoce (3 anos) de mudanças na qualidade do solo devido a sistemas de manejo o solo.

As atividades enzimáticas observadas neste estudo sustentam a hipótese de que a inserção de eucalipto na pastagem leva a condições favoráveis para uma diversidade funcional equilibrada do solo, refletida pelas maiores atividades enzimáticas em comparação com solos sob pastagem a pleno sol e vegetação nativa Cerrado. Maior atividade da enzima β -Glucosidase foi observada no sistema integrado em comparação com a pastagem a pleno sol e Cerrado, isso pode estar associada à composição e qualidade dos resíduos das plantas (Lopes et al., 2013; Lopes et al., 2015). A enzima β -Glucosidase atua na fase final do processo de decomposição da celulose e é responsável pela hidrólise de resíduos de celulose formando a β -D-glicose (Tabatabai, 1994; Paul e Clark, 1996). Uma vez que a celulose é um dissacarídeo de rápida decomposição no solo, sua presença poderia explicar a relação entre os altos teores de atividade da β -glucosidase e os maiores teores de C, observados no sistema integrado com eucalipto a 0 m (Figura 6). A inserção do eucalipto na pastagem aumentou a atividade da β -glucosidase, devido aos resíduos das plantas adicionados ao sistema, apesar da maior diversidade e complexidade dos resíduos vegetais do sistema integrado como raízes, ramos, folhas, podendo dificultar a quantidade de C mineralizável no solo, o que poderia reduzir a atividade da enzima β -glucosidase, não foi isso o observado, já que a atividade da enzima β -glucosidase foi aumentada em função da inserção do eucalipto na área de pastagem.

Os níveis relativamente altos de atividade da fosfatase ácida observados no solo da vegetação nativa (Cerrado) podem ser resposta microbiana à deficiência de P nessas áreas. Nessas condições, a produção de fosfatase ácida é estimulada e exsudada por raízes de plantas e micro-organismos do solo, aumentando a liberação de P inorgânica a partir de compostos P orgânicos (Sinsabaugh et al., 1993). Por outro lado, quando níveis elevados de P inorgânica estão disponíveis no solo, a produção da fosfatase ácida parece ser inibida, o que demonstra a importância desta enzima na mineralização do fósforo orgânico em áreas

sob vegetação nativa, onde a matéria orgânica é a principal fonte de nutrientes para o crescimento das plantas.

Sabe-se que a atividade da enzima β -glucosidase é aumentada na estação chuvosa devido a maior decomposição da palhada acumulada na estação seca (Cleveland et al., 2004). Diferenças nas atividades das enzimas do solo bG, AP e NAG, especialmente na profundidade de 0-0,05 m, tendem a ser maiores no sistema integrado com eucalipto que na pastagem a pleno sol e a vegetação nativa (Cerrado). Chaer e Tótola 2007, estudando características microbiológicas em solos sob eucalipto com 11 anos de idade e uma vegetação nativa observaram que as atividades das enzimas β -glucosidase e das fosfatases ácida foram consistentemente maiores no solo sob vegetação nativa.

A comunidade microbiana do solo não foi modificada pela inserção do eucalipto na pastagem. De acordo com Rice (1984), o menor crescimento e atividade microbiana sob o eucalipto pode ter sido devido ao impacto tóxico de compostos aleloquímicos liberados da decomposição de compostos orgânicos do eucalipto. No entanto, isso não ocorreu no presente estudo, já que o sistema integrado com eucalipto apresentou a atividade microbiana semelhante a área de pastagem a pleno sol. Isso sugere que a composição da comunidade microbiana do solo não foi afetada pela inserção do componente florestal no sistema.

A vegetação nativa (Cerrado) apresentou a maior biomassa microbiana, Actinomicetos, Gram +, fungos micorrízicos arbusculares e fungos em comparação com o sistema integrado com eucaliptos e pastagem a pleno sol. Várias propriedades físico-químicas do solo que podem ser afetadas pelo manejo do solo foram relatadas como impactando as comunidades microbianas do solo, que incluem a umidade, pH, C e N do solo, densidade aparente e porosidade (Drenovsky et al., 2010; Wakelin et al., 2008). O cerrado apresentou a menor densidade do solo, maiores níveis de P (Tabela 1) e maior umidade do solo, podem ter favorecido a atividade microbiana. Maior compactação do solo resulta em condições menos favoráveis para os micro-organismos do solo e suas atividades, causando limitada difusão de gás, nutrientes e movimentos da água (Pengthamkeerati et al., 2011; Tan et al., 2005), alterando assim severamente a abundância de grupos microbianos.

Contrário às comunidades microbianas do solo, a atividade da β -glucosidase foi maior no sistema integrado em relação a vegetação nativa (Cerrado) e a pastagem a pleno sol (Figura 6), possivelmente devido à qualidade e quantidade de resíduos vegetais, que são mais complexos na vegetação nativa (Cerrado) não perturbado e na pastagem, uma vez que a β -glucosidase atua em resíduos menos complexos (Lopes et al., 2013; Mendes et al.,

2003). O aumento da atividade enzimática está proporcionalmente ligado à função microbiana (Caldwell, 2005), levando a ciclos e disponibilidade de nutrientes, o que favorece o crescimento radicular, promove interações microbianas benéficas e, eventualmente, aumenta o estoque de carbono do solo. Atividades enzimáticas do solo são indicadores sensíveis da qualidade do solo e podem responder às mudanças no uso do solo mais rápido que outras propriedades do solo (Medeiros et al., 2015).

As bactérias (Gram + e Gram -) diferiram significativamente entre os sistemas de manejo do solo. Vários autores demonstraram mudanças na estrutura das comunidades bacterianas em resposta a mudanças de gestão em diferentes sistemas (Aboim et al., 2008; Peixoto et al., 2010; Rachid et al., 2012), destacando a comunidade microbiana também como indicador sensível da qualidade do solo. A maior abundância de AMF e fungos observados no Cerrado estão associados aos altos estoques de C e N na vegetação nativa, os fungos incorporam mais C do solo em sua biomassa em relação as bactérias e a taxa de renovação do C são mais lentas nos ecossistemas dominados pelos fungos (Six et al., 2006). A maior recalcitrância presumida de subprodutos de fungos versus de bactérias leva a maior estoque de C no solo em que estruturas fúngicas são predominantes (Six et., 2006).

3.5 Conclusões

O sistema integrado de produção agropecuária mostrou estratificação da umidade do solo, com menor umidade do solo próximo à linha de plantio de eucalipto.

Após oito anos de inserção do eucalipto na pastagem, na linha de plantio do eucalipto (0 m) e na pastagem a pleno sol os estoques de C e N foram ao Cerrado nativo, mostrando o potencial do sistema integrado para conservar os estoques de C e N no solo, com incremento nas atividades enzimáticas extracelulares do solo. No entanto, a distribuição dos agregados do solo foi semelhante no sistema integrado, na pastagem e na vegetação nativa (Cerrado).

A comunidade microbiana do solo não é afetada pela introdução do eucalipto no sistema, mas é maior na vegetação nativa (Cerrado). Os efeitos do sistema integrado na umidade do solo, tamanho agregado, enzimas do solo e comunidades microbianas não são dependentes dos eucaliptos.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), (2014/10656-3 e 2016/14323-4), e pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento pessoal de Nível Superior).

Referências

- Allison, V.J., Miller, R.M. 2005. Soil grinding increases the relative abundance of eukaryotic phospholipid fatty acids. *Soil Science Society of America Journal* 69, 423–426. DOI: 10.2136/sssaj2005.0423
- Bardgett, R.D., Hobbs, P.J., Frostegård, A. 1996. Changes in soil fungal: bacterial biomass ratios following reductions in the intensity of management of an upland grassland. *Biology and Fertility of Soils* 22, 261-264. DOI: 10.1007/BF00382522
- Beare, M.H. 1997. Fungal and bacterial pathways of organic matter decomposition and nitrogen mineralization in arable soils. In: Brussaard, L., Ferrera-Cerrato, R. (Ed.) *Soil ecology in sustainable agricultural systems*. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 37–70.
- Bell, C., McIntyre, N., Cox, S., Tissue, D., Zak, J. 2008. Soil microbial responses to temporal variations of moisture and temperature in a Chihuahuan desert grassland. *Microbial Ecology* 56, 153–167. DOI: 10.1016/j.still.2005.11.002
- Bligh, E.G., Dyer, W.J. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology* 37, 911–917. DOI: 10.1139/o59-099
- Bossio, D.A., Scow, K.M. 1998. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities: Phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns. *Microbial Ecology* 35, 265–278. DOI: 10.1007/s0024899000
- Caldeira, K., Morgan, M.G., Baldocchi, D., Brewer, P.G., Chen, C.T.A., Nabuurs, G.J., Nakicenovic, N., Robertson, G.P. 2004. A portfolio of carbon management options. In: Field, C.B., Raupach, M.R. (Ed.) *The Global carbon cycle*. Island, Washington, pp. 103–129.
- Caldwell, B.A. 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia* 49, pp. 637-644. DOI: 10.1016/j.pedobi.2005.06.003

- Cao, Y.S., Fu, S.L., Zou, X.M., Cao, H.L., Shao, Y.H., Zhou, L.X. 2010. Soil microbial community composition under Eucalyptus plantations of different age in subtropical China. *European Journal of Soil Biology* 46, 128-135. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2009.12.006
- Carson, J.K., Gleeson, D.B., Clipson, N., Murphy, D.V. 2010. Afforestation alters community structure of soil fungi. *Fungal Biology* 114, 580-584. DOI: 10.1016/j.funbio.2010.04.008
- Chaer, G.M., Tótolá, M.R. 2007. Impact of organic residue management on soil quality indicators during replanting of eucalypt stands. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31, 1381-1396. DOI: 10.1590/S0100-06832007000600016
- Cleveland, C.C., Townsend, A.R., Constance, B.C. 2004. Soil microbial dynamics in Costa Rica: seasonal and biogeochemical constraints. *Biotropica* 36, 184–195. DOI: 10.1646/03115-Q1562
- Delgado, J.A., Nearing, M.A., Rice, C.W. 2013. Conservation practices for climate change adaptation. *Advances in Agronomy* 121, 47–115. DOI: 10.2489/jswc.66.4.118A.
- Denef, K., Six, J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregates formation and stabilization. *European Journal of Soil Science* 56, 469–479. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2004.00682.x
- Drenovsky, R.E., Steenwerth, K.L., Jackson, L.E., Scow, K.M. 2010. Land use and climatic factors structure regional patterns in soil microbial communities. *Global Ecology and Biogeography* 19, 27-39. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2009.00486
- Eaton, W.D., Chassot, O. 2012. Characterization of soil ecosystems in Costa Rica using microbial community metrics. *Journal of Tropical Ecology* 53, 185-195.
- Eclesia, R.P., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., Biganzoli, F., Piñeiro, G. (2012) Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America *Glob. Chang. Biol.*, 18, pp. 3237-3251. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02761.x
- Fabrizzi, K.P., Rice, C.W., Amado, T.J.C., Fiorin, J., Barbagelata, P., Melchiori, R. 2009. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. *Soil Biology and Biogeochemistry* 92, 129–143. DOI: /10.1007/s10533-008-9261-0
- Ferreira, D. F. 2011. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia* 35, 1039-1042. DOI: 10.1590/S1413-70542011000600001

- Fierer, N., Allen, A.S., Schimel, J.P., Holden, P.A. 2003. Controls on microbial CO₂ production: A comparison of surface and subsurface soil horizons. *Global Change Biology* 9, 1322–1332. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00663.x
- Frey, S.D., Elliott, E.T., Paustian, K. 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 573–585. DOI: 10.1016/S0038-0717(98)00161-8
- Frouz, J., Toyota, A., Mudrak, O., Jilkova, V., Filipova, A., Cajthaml, T. 2016. Effects of soil substrate quality, microbial diversity and community composition on the plant community during primary succession. *Soil Biology and Biochemistry* 99, 75-84. DOI 10.1016/j.soilbio.2016.04.024.
- Haile, S.G., Nair, P.K.R., Nair, V.D. 2008. Carbon storage of different soil size-fractions in Florida silvopastoral systems. *Journal of Environmental Quality* 37, 1789–1797. DOI: 10.2134/jeq2007.0509
- Haynes, R.J., Beare, M.H. 1996. Aggregation and organic matter storage in Mesothermal Humid soils. In: Carter, M.R., Stuart, B.A. (Ed.) *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Boca Raton, Lewis Publishers, pp. 213-262.
- Haynes, R.J., Beare, M.H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry* 29, 1647-1653. DOI: 10.1016/S0038-0717(97)00078-3
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: Synthesis report*. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Core writing team, Pachauri RK. And Reisinger A (Ed.) IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Lal, R. 2004. Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70, 103–116. DOI: 10.1023/B:FRES.0000048480.24274.0f
- Lisboa, F.J.G., Chaer, G., Fernandes, M.F., Berbara, R.L.L., Madari, B. .2014. The match between microbial community structure and soil properties is modulated by land use types and sample origin within an integrated agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry* 78, 97–118. DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.07.017
- Liu, A., Ma, B.L., Bomke, A.A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of America Journal* 69, 2041-2048. DOI: 10.2136/sssaj2005.0032
- Lopes, A.A.C., Sousa, D.M.G., Chaer, G.M., Reis Junior, F.B., Goedert, W.J., Mendes, I.C. 2013. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and

- organic carbon. *Soil Science Society of America Journal* 77, 461–72. DOI: 10.2136/sssaj2012.0191.
- Lopes, A.A.C., Sousa, D.M.G., Reis Junior, F.B., Mendes, I.C. 2015. Air-drying and long-term storage effects on β -glucosidase, acid phosphatase and arylsulfatase activities in a tropical savannah oxisol. *Applied Soil Ecology* 93, 68–77. DOI: 10.1016/j.apsoil.2015.04.001
- López-Pintor, A., Gómez Sal, A., Rey Benayas, J.M. 2006. Shrubs as a source of spatial heterogeneity—the case of *Retama sphaerocarpa* in Mediterranean pastures of central Spain. *Acta Oecologica* 29, 247–255. DOI: 10.1016/j.actao.2005.11.001
- McKinley, V.L., Peacock, A.D., White, D.C. 2005. Microbial community PLFA and PHB responses to ecosystem restoration in tallgrass prairie soils. *Soil Biology and Biochemistry* 37, 1946–1958. DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.02.033
- Medeiros, E.V., Notaro, K.A., Barros, J.A., Moraes, W.S., Silva, A.O., Moreira, K.A. (2015). Absolute and specific enzymatic activities of sandy entisol from tropical dry forest, monoculture and intercropping areas. *Soil & Tillage Research* 145, 208–215. DOI: 10.1016/j.still.2014.09.013
- Mendes, I., Souza, L., Resck, D., Gomes, A. 2003. Biological properties of aggregates from a Cerrado Oxisol under conventional and no-till management systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27, 435–43. DOI: 10.1590/S0100-06832003000300005
- Mendes, I.C., Fernandes, M.F., Chaer, G.M., dos Reis Junior, F.B. 2012. Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. *Plant Soil*. 359, 183–95. DOI: 10.1007/s11104-012-1195-6
- Michelsen, A., Andersson, M., Jensen, M., Kjøller, A., Gashew, M. 2004. Carbon stocks, soil respiration and microbial biomass in fire-prone tropical grassland: woodland and forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 36, 1707–1717. DOI: 10.1016/j.soilbio.2004.04.028
- Mikha, M.M., Rice, C.W. 2004. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal* 68, 809–816. DOI: 10.2136/sssaj2004.0809
- Nair, P.K.R., B.M. Kumar, Nair, V.D. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172, 10–23. DOI: 10.1002/jpln.200800030

- Nair, P.K.R., V.D. Nair, B.M. Kumar, and J.M. (2010) Showalter. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Adv. Agron.* 108:237–307. DOI: 10.1016/S0065-2113(10)08005-3
- Nelson, D.W., Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter: Laboratory methods. In: Sparks, D.L. (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. SSSA Book Ser. 5.* SSSA, Madison, WI. pp. 961–1010.
- Öpik, M., Moora, M., Liira, J., Zobel, M. 2006. Composition of root-colonizing arbuscular mycorrhizal fungal communities in different ecosystems around the globe. *Journal of Ecology* 94, 778-790. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2006.01136.x
- Ottmar, R.D., Vihnanek, R.E., Miranda, H.S., Sato, M., Andrade, S.M.A. 2001. Stereo photo series for quantifying Cerrado Fuels in Central Brazil, vol 1. Gen Tech Rep PNW-GTR, Portland, OR, 87 pp
- Paul, E.A., Clark, F.E. 1996. *Soil microbiology and biochemistry.* San Diego, Academic Press, 340 pp.
- Paustian, K., Six, J., Elliot, E.T., Hunt, H.W. 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 18, 147–163. DOI: 10.1023/A:1006271331703
- Pengthamkeerati, P., Motavalli, P.P., Kremer, R.J. 2011. Soil microbial activity and functional diversity changed by compaction, poultry litter and cropping in a claypan soil *Applied Soil Ecology* 48, 71-80. DOI: 10.1016/j.apsoil.2011.01.005
- Post, W.M., Izaurralde, R.C., Jastrow, J.D., McCarl, B.A., Amonette, J.E., Bailey, V.L., Jardine, P.M., West, T.O., Zhou, J. 2004. Enhancement of carbon sequestration in the US soils. *BioScience* 54, 895–908. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0895:EOCSIU]2.0.CO;2
- Pulrolnik, K., Barros, N. F. de, Silva, I. R., Novais, R. F., Brandani, C. B. 2009. 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* 33, 1125-1136. DOI: 10.1590/S0100-06832009000500006
- Rice, E.L., 1984. *Allelopathy*, 2nd (Ed.). Academic Press, Orlando, FL, 422 pp.
- Sanchez, P. 1976. *Properties and management of soils in the tropics.* New York: John Wiley, 618 pp.
- Schoeneberger, M., Bentrup, G., de Gooijer, H., Soolanayakanahally, R., Sauer, T., Brandle, J., Zhou, X., Current, D. 2012. *Branching out: agroforestry as a climate*

- change mitigation and adaptation tool for agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation* 67, 128A–136A. DOI:10.2489/jswc.67.5.128A
- Sinsabaugh, R., Antibus, R., Linkins, A., McClaugherty, C., Rayburn, L., Repert, D., Weiland, T. 1993. Wood decomposition: nitrogen and phosphorus dynamics in relation to extracellular enzyme activity. *Ecology* 74, 1586–1593. DOI: 10.2307/1940086
- Six, J., Frey, S.D., Thiet, R.K., Batten, K.M. 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 70, 555–569. DOI: 10.2136/sssaj2004.0347
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*, 241, 155–176. DOI: 10.1023/A:1016125726789
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Ogle, S., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., Smith, J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, 789–813. DOI: 10.1098/rstb.2007.2184
- Souza, R.C., Mendes, I.C., Reis-Junior, F.B., Carvalho, F.M., Nogueira, M.A., Vasconcelos, A.T.R., Vicente, V., Hungria, M. 2014. Shifts in taxonomic and functional microbial diversity with agriculture: How fragile is the Brazilian Cerrado? *BMC Microbiology* 16, 1–15. DOI: 10.1186/s12866-016-0657-z
- Staff, S.S. Keys to soil taxonomy. 12th (Ed.), Washington, DC.: USDA–Natural Resources Conservation Service.
- Tabatabai, M.A. Soil enzymes. In: Weaver, R.W., Scott, A., Bottomeley, P.J., 1994 (Ed.). *Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties*. Madison, Soil Science Society of America, pp. 778–835, (Special Publication, 5).
- Tonucci, R.G., Garcia, R., Nair, P.K.R., Nair, V.D., Bernardino, F.S. 2011. Soil carbon storage in silvopasture and related land-use systems in the Brazilian Cerrado. *Journal of Environmental Quality* 40, 833–841. DOI: 10.2134/jeq2010.0162
- Vallejo, V.E., Arbeli, Z., Terán, W., Lorenz, N., Dick, R.P., Roldan, F. 2012. Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and enzymatic activities in intensive silvopastoral systems of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 150, 139–148. DOI:10.1016/j.agee.2012.01.022

- Wakelin, S.A., Macdonald, L.M., Rogers, S.L., Gregg, A.L., Bolger, T.P., Baldock, J.A. 2008. Habitat selective factors influencing the structural composition and functional capacity of microbial communities in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 803-813. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.10.015
- Waring, B.G., Weintraub, S.R., Sinsabaugh R.L. 2014. Eoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils. *Biogeochemistry* 117, 101-113. DOI: 10.1007/s10533-013-9849-x
- West, T.O., Post, W.M. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1930–1946. DOI: 10.3334/CDIAC/tcm.002
- White, P.M. Jr, Rice, C.W. 2009. Tillage effects on microbial and carbon dynamics during plant residue decomposition. *Soil Science Society of America Journal* 73, 1–8. DOI:10.2136/sssaj2007.0384
- White, D.C., Ringelberg, D.B. 1998. Signature lipid biomarker analysis. In Burlage, R.S. et al. (Ed.) *Techniques in microbial ecology*. Oxford Univ. Press, New York, pp. 255–272.
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of soil erosion losses. *American Society of Agronomy* 28, 337–351. DOI: 10.2134/agronj1936.00021962002800050001x

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A hipótese de que a inserção do eucalipto em áreas de pastagem pode modificar a quantidade e distribuição do sistema radicular das espécies em profundidade, o crescimento das plantas forrageiras, os estoques de C e N no solo além das propriedades microbiológicas foram confirmados.

A inserção do eucalipto em área de pastagem modifica a produtividade de forragem, a densidade de comprimento radicular, e a quantidade de raízes das diferentes espécies até 1 m de profundidade. A quantidade total de raízes no solo é menor com a inserção do componente florestal em área de pastagem bem manejada até 1 m de profundidade.

Os estoques de C variaram de 62–65 Mg ha⁻¹ no sistema integrado de produção, não diferindo entre os eucaliptos, e nem quanto às distâncias do eucalipto, no entanto, sistema integrado de produção manteve os estoques de C próximo da condição inicial (66 Mg ha⁻¹). A análise isotópica do solo não revelou mudança nos valores $\delta^{13}\text{C}$ em função da inserção do eucalipto (C₃) no SIPA até 1 m.

O sistema integrado de produção agropecuária mostrou estratificação da umidade do solo, com menor umidade do solo próximo à linha de plantio de eucalipto.

Após oito anos de inserção do eucalipto na pastagem, na linha de plantio do eucalipto e na pastagem apresentaram os estoques de C e N semelhantes ao Cerrado nativo, mostrando o potencial do sistema integrado para conservar os estoques de C e N, com incremento nas atividades enzimáticas extracelulares do solo. No entanto, a distribuição dos agregados do solo foi semelhante no sistema integrado, na pastagem e na vegetação nativa (Cerrado).

A comunidade microbiana do solo não é afetada pela introdução do eucalipto no sistema, mas é maior na vegetação do Cerrado. Os efeitos do sistema integrado na umidade do solo, tamanho agregado, enzimas do solo e comunidades microbianas não são dependentes dos eucaliptos.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A.G.; COSTA, G.S.; FARIA, S.M. Deposição e decomposição da serapilheira em povoamentos de *Mimosa caesalpinifolia*, *Acacia mangium* e *Acacia holosericea* com quatro anos de idade em planossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 777-785, 2000.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. i-xii, out. 2011.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P. R.; VILELA, L. Agricultura sustentável por meio da Integração Lavoura Pecuária-Floresta (ILPF). **Informações Agronômicas IPNI**, n. 138, p. 1-18, jul. 2012.
- BAUHUS, J.; KHANNA, P.K.; MENDEN, N. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, n. 12, p. 1886-1894, 2000.
- CASPER, B. B.; JACKSON, R.B. Plant competition underground. **Annual Review of Ecological Systems**, Palo Alto, v. 28, p. 545-570, 1997.
- DIEL, D.; BEHLING, M.; FARIAS NETO, A.L. DE; ISERNHAGEN, E. C. C. Distribuição horizontal e vertical de fósforo em sistemas de cultivos exclusivos de soja e de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.49, n.8, p. 639- 647, ago. 2014.
- DIXON, R.K. Agroforestry systems: source or sinks of greenhouse gases? **Agroforestry Systems**, 31: 99-116, 1995.
- DOCHERTY, K.M.; GUTKNECHT, J.L.M. The role of environmental microorganisms in ecosystem responses to global change: current state of research and future outlooks. **Biogeochemistry**, v. 109, p. 1–6, 2012.
- FORRESTER, D. I. et al. Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, 2006.
- FREITAS, E.C.S. de; OLIVEIRA NETO, S.N. de; FONSECA, D.M. da; SANTOS, M.V.; LEITE, H.G.; MACHADO, V.D. Deposição de serapilheira e de nutrientes no solo em sistema agrossilvipastoril com eucalipto e acácia. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 409-417, 2013.
- GALIANA, A. et al. Nitrogen fixation estimated by the ¹⁵N natural abundance method in *Acacia mangium* Willd. Inoculated with *Bradyrhizobium* sp. and grown

in silvicultural conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 2, p. 251-262, 2002.

GARCIA, A. R. et al. Variáveis fisiológicas de búfalas leiteiras criadas sob sombreamento em sistemas silvipastoris. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1409-1414, 2011.

GUPTA, V. V. S. R.; GERMIDA, J. J. Distribution of microbial and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. **Soil Biol. Biochem.** v. 20, p. 777-786, 1988.

HAYNES, R. J.; SWIFT, R. S. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. **J. Soil Science.** v. 41, p. 73-83, 1990.

JOSE, S.; GILLESPIE, A. R.; PALLARDY, S. G. Interspecific interactions in temperate agroforestry. **Agroforestry Systems**, v. 61-62, n. 1, p. 237-255, 2004.

JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. **Agroforestry Systems**, v. 76, p. 1-10, 2009.

KAMAA, M. et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil bacterial and fungal microbial diversity in the Kabete long-term trial, Kenya. **Biology and Fertility of Soils**, v. 47, p. 315–321, 2011.

KAYE, P. J. et al. Nutrient and carbon dynamics in a replacement series of Eucalyptus and Albizia trees. **Ecology**, v. 81 n. 12, p. 3267-3273, 2000.

LOSS, A. et al. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1269-1276, 2011.

MAJDI, H. et al. Fine root turnover in forest ecosystems. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 276, p. 1-8, 2005.

MARTIN, K. J.; POSAVATZ, N. J.; MYROLD, D. D. Nodulation potential of soils from red alder stands covering a wide age range. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 254, p. 187-192, 2003.

McCORMACK, M. L. et al. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. **New Phytologist**, London, v. 207, p. 505–518, 2015.

MENDES, I. C. et al. **Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: utopia ou realidade?** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. 31p. (Doc. 246).

MERCANTE, F. M. et al. Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 4, p. 479-485, 2008.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P.K.R. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**. V. 61, p. 281–295, 2004.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002. 625p.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2006.

OELBERMANN, M.; VORONEY, P. Carbon and nitrogen in a temperate agroforestry system: Using stable isotopes as a tool to understand soil dynamics. **Ecological Engineering**, V. 29, n. 4, p. 342-349, 2007.

PORFÍRIO-DA-SILVA, V. Ecologia e manejo em sistema silvipastoril. In: FERNANDES, E. N.; PACUILLO, D. S.; CASTRO, C. R. T. de; MULLER, M. D.; ARCURI, P. B.; CARNEIRO, J. da C. (Ed.). **Sistemas agrossilvipastoris na América do Sul: desafios e potencialidades**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2007. p. 51-67.

PRENTICE, I. C. et al. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M., et al. (ED). Climate change 2001: The scientific Basic. In **ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)** 3. 2001. Cambridge working Group... Cambridge University Press, Cambridge, 2001. p. 183-237.

QUECINE, M.C. et al. Sugarcane Growth Promotion by the Endophytic Bacterium *Pantoea agglomerans* 33.1. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 78, p. 7511-7518, 2012.

ROUSSEAU, G.X. et al. Indicating soil quality in cacao-based agroforestry systems and old-growth forests: The potential of soil macrofauna assemblage. **Ecological Indicators**, v. 23, p. 535–543, 2012.

SHIBU, J.; WILLIAMS, R.; ZAMORA, D. Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 231-239, 2006.

SILVA, J. A. R. et al. Conforto térmico de búfalas em sistema silvipastoril na Amazônia Oriental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1364-1371, 2011.

SILVER, W.L. et al. Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forest soils, **Global Change Biol.**, v. 11, p. 290-306, 2005.

SINGH, B.K. et al. Impact of biotic and abiotic interaction on soil microbial communities and functions: A field study. **Applied Soil Ecology**, v. 41, p. 239–248, 2009.

SIX, J. et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 555–569, 2006.

SIX, J. et al. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. **Global Change Biology**, v. 10, p. 155–160, 2004.

SPACCINI, R. et al. Carbohydrates in water-stable aggregates and particle size fractions of forested and cultivated soils in two contrasting tropical ecosystems. **Biogeochemistry**, v. 22, p. 1-22, 2001.