

GUILHERME LUIZ DE JESUS

**COMPACTAÇÃO DO SOLO, ESPAÇAMENTO DE PLANTIO, RESÍDUOS
DE COLHEITA E DÉFICIT DE SATURAÇÃO DE CARBONO NA
MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO SOB POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

J58c
2012

Jesus, Guilherme Luiz de, 1982-

Compactação do solo, espaçamento de plantio, resíduos de colheita e déficit de saturação de carbono na matéria orgânica do solo sob povoamentos de eucalipto / Guilherme Luiz de Jesus. – Viçosa, MG, 2012.

xii, 104f. : il. ; (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Ivo Ribeiro da Silva

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Solos. 2. Solos florestais. 3. Solos - Compactação.
4. Humus. 5. Espaçamento. 6. Sustentabilidade. 7. Colheita.
8. Carbono - Isótopos. 9. Eucalipto - Nutrição.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

GUILHERME LUIZ DE JESUS

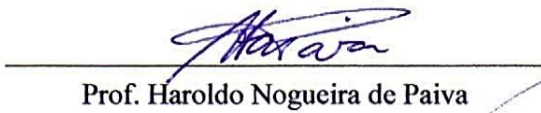
COMPACTAÇÃO DO SOLO, ESPAÇAMENTO DE PLANTIO, RESÍDUOS DE COLHEITA E DÉFICIT DE SATURAÇÃO DE CARBONO NA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO SOB POVOAMENTOS DE EUCALIPTO

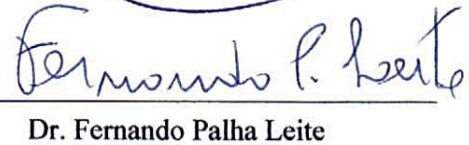
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de “Doctor Scientiae”.

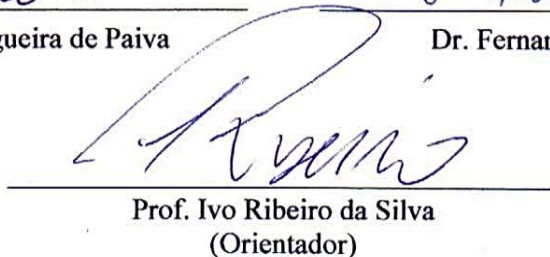
APROVADA: 20 de julho de 2012


Prof. Júlio César Lima Neves


Prof. Genécio Crusóé Rocha


Prof. Haroldo Nogueira de Paiva


Dr. Fernando Palha Leite


Prof. Ivo Ribeiro da Silva
(Orientador)

A Deus,

Aos meus queridos pais Afonso e Marlene,

À minha amada Myriam,

Aos meus irmãos Thiago e Nathália

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial, ao Departamento de Solos, pela oportunidade e condições oferecidas para a realização deste curso;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudo até no ato de minha contratação pela CENIBRA.

À Celulose Nipo-Brasileira (CENIBRA), pela oportunidade de trabalhar em suas áreas de pesquisa, pelo apoio na coleta dos dados; e, principalmente, pela oportunidade de emprego.

Ao Prof. Ivo Ribeiro da Silva, pela amizade e orientação, pela oportunidade a mim concedida de iniciação à ciência do solo, pelos conselhos e dedicação a este trabalho e pelos ensinamentos transmitidos.

Ao Prof. Júlio César Lima Neves, pela amizade, pela prontidão em sempre ajudar, e pelas sugestões fundamentais à conclusão deste trabalho, fazendo, na prática, o papel de co-orientador.

Ao Dr. Fernando Palha Leite, ao Prof. Haroldo Nogueira de Paiva e ao Prof. Genelício Crusoé Rocha, pela dedicação à ciência, pelas críticas e sugestões que muito contribuíram para a realização deste trabalho;

Ao Luis Fernando que muito contribuiu para a montagem, execução e análises laboratoriais não só dos experimentos aqui apresentados, sendo um exemplo de profissional, compromisso, e pela amizade.

Ao Gilson Gaudereto, pela amizade, pelo apoio e bons momentos vividos na coleta dos dados de campo;

Ao Reginaldo, responsável técnico pelo Laboratório de Isótopos Estáveis pelo auxílio nas análises;

Aos funcionários do DPS, principalmente ao Carlinhos, Carlos Fonseca, Cláudio, Bené, Luciana, Claudinha e Sônia pela presteza e amizade;

Aos colegas do curso de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela amizade e companheirismo;

Aos colegas do Laboratório de Isótopos Estáveis, pela convivência, amizade e momentos de descontração;

Aos colegas da GGF-P da CENIBRA, pela convivência e incentivo;

Aos grandes amigos, mesmo que ausentes por alguns momentos da vida, Lucas, Christopher, Dalton, Geraldo, Vivi, Elen, Clínger e Michelle Demolinari, mas eternos amigos;

Aos amigos de toda hora e participantes das noites de queijos e vinhos Silvano, Anderson, Fabrício, Fernandinha, Helton e Michelle pela amizade sincera e pelo estímulo em todos os momentos;

Aos meus pais pelo amor incondicional, pelo exemplo e ensinamentos, pelo apoio nos momentos difíceis e pelo orgulho nos momentos de vitória, pela dedicação e esforço durante toda minha vida que me possibilitaram chegar até aqui;

À minha amada Myriam, eterna amiga e companheira, pelo amor sincero, pelo exemplo e paciência, pelo incentivo diário, e por estar ao meu lado ao longo desses anos construindo nossa história;

Aos meus irmãos Nathália e Thiago, eternos amigos e companheiros, pelo amor fraterno, incentivo e momentos de descontração;

À minha madrinha Dinha e meu padrinho Gilberto, pelo carinho, bondade e por sempre torcerem por mim;

Ao Sr. Alberino, à Sra. Taís e a seus filhos e netos, por me adotarem como filho/irmão/tio, pelo carinho e incentivo de todos estes anos;

A todos que participaram dos bons momentos e dos tropeços que tive nessa jornada.

BIOGRAFIA

GUILHERME LUIZ DE JESUS, filho de Afonso Perpétuo de Jesus e Marlene Olímpia de Jesus, nasceu em Belo Horizonte, em 15 de dezembro de 1982.

Em 2001 iniciou o Curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais. Em agosto de 2002 iniciou um estágio em pesquisa no Departamento de Solos da UFRV, onde foi bolsista de iniciação científica pela FAPEMIG por dois anos consecutivos. De setembro de 2005 a abril de 2006 estagiou na V&M Florestal na área de silvicultura.

Em outubro de 2006, graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa.

Em outubro de 2006, iniciou o Curso de Mestrado na Universidade Federal de Viçosa, concentrando seus estudos na área de fertilidade do solo e nutrição de plantas, terminando-o em 30 de julho de 2008.

Em agosto de 2008, iniciou o Curso de Doutorado na Universidade Federal de Viçosa, sendo idealizador e coordenador geral do I Simpósio Mineiro de Solos realizado em novembro de 2010 em Viçosa.

Em novembro de 2010 foi contratado pela área de pesquisa da Celulose-Nipo Brasileira (CENIBRA) como especialista em Solos, Nutrição e Manejo, finalizando o doutorado em 20 de julho de 2012.

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	XI
CAPÍTULO 1	1
PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO, PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA INFLUENCIADAS PELA INTENSIDADE DE TRÁFEGO E RESÍDUOS DE COLHEITA	1
RESUMO	1
SUMMARY	2
INTRODUÇÃO	3
MATERIAL E MÉTODOS	4
Descrição da área de estudo	4
Coleta e análises de amostras de solo	5
Medição, coleta e análise do material vegetal.....	6
RESULTADOS	7
Produtividade florestal	7
Propriedades físicas do solo	11
Frações da matéria orgânica do solo	8
DISCUSSÃO	12
CONCLUSÕES	16
LITERATURA CITADA	17
ANEXOS	31
CAPÍTULO 2	36
PRODUTIVIDADE DE MADEIRA E CELULOSE, E FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DE LATOSSOLOS INFLUENCIADAS PELO ESPAÇAMENTO DO EUCALIPTO EM ROTAÇÃO DE 11 ANOS	36
RESUMO	36
SUMMARY	37
INTRODUÇÃO	38
MATERIAL E MÉTODOS	41
Descrição da área de estudo	41
Coleta e análises de amostras de solo	42
Medição, coleta e análise do material vegetal.....	42
RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
Produtividade florestal	44
Produção de biomassa e serapilheira.....	47
Frações da matéria orgânica do solo	49
CONCLUSÕES	51
LITERATURA CITADA	51
ANEXOS	63
CAPÍTULO 3	67
ESTABILIZAÇÃO DO ¹³ C DO RESÍDUO DE EUCALIPTO EM SOLOS DISTINTOS: CONTRIBUIÇÃO DOS COMPONENTES DA PLANTA E DO DÉFICIT DE SATURAÇÃO DE CARBONO	67
RESUMO	67
SUMMARY	68
INTRODUÇÃO	69
MATERIAL E MÉTODOS	71
Local de estudo e tratamentos	71

Análise do solo.....	71
Resíduos de eucalipto.....	72
Marcação com ¹³ C.....	72
Incubação	73
Fracionamento da matéria orgânica do solo.....	74
Análise de C e N das frações.....	74
RESULTADOS.....	75
DISCUSSÃO	78
CONCLUSÕES	82
LITERATURA CITADA	83
ANEXOS	96

RESUMO

JESUS, Guilherme Luiz de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2012. **Compactação do solo, espaçamento de plantio, resíduos de colheita e déficit de saturação de carbono na matéria orgânica do solo sob povoamentos de eucalipto.** Orientador: Ivo Ribeiro da Silva. Coorientadores: Roberto Ferreira de Novais e Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.

O setor florestal tem crescido anualmente face a necessidade crescente por produtos florestais. Em relação a 2009, a área de plantios florestais em 2010 aumentou 3,2 %, chegando a 4.752.806 ha de área ocupada por plantios de eucalipto no Brasil (ABRAF, 2011). A presente tese é composta por três estudos. No capítulo 1 foram avaliadas a produtividade do eucalipto, propriedades físicas do solo e frações da matéria orgânica do solo (MOS) influenciadas pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. No capítulo 2 avaliou-se a produtividade de madeira e celulose, e frações da matéria orgânica de Latossolos influenciadas pelo espaçamento do eucalipto em rotação de 11 anos. No capítulo 3 avaliou-se a estabilização do ^{13}C do resíduo de eucalipto em solos distintos e a contribuição dos componentes da planta e do déficit de saturação de C. O número de passadas das máquinas, tipos de rodados e a alta umidade do solo durante as operações agravam o processo de compactação, devendo-se conhecer estes impactos e quais alternativas para reduzi-los. O objetivo do primeiro capítulo foi avaliar o impacto de diferentes intensidades de tráfego do *forwarder* e o efeito de condições distintas de resíduos da colheita do eucalipto ao fim da rotação subsequente na produtividade, nas propriedades físicas do solo e da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho (LV), localizado em São João Evangelista – MG e um Latossolo Amarelo (LA), localizado em Belo Oriente. Os tratamentos consistiram de um esquema fatorial 2 x 3, sendo: duas ou oito passadas na entrelinha sobre resíduo da colheita sem casca (SC); com casca (CC), ou sem resíduo (SR). A perda de produtividade dos plantios pela compactação do solo proveniente das passadas do *forwarder* é atenuado com a permanência dos resíduos da colheita especialmente com a manutenção da casca na área. A remoção de resíduo, particularmente quando há remoção da casca, leva a redução do C orgânico total e de frações mais lábeis de C e N do solo. O tráfego do *forwarder* na colheita do eucalipto da rotação anterior sobre solo sem resíduos promove perdas na qualidade física do solo, com aumento da densidade e resistência a penetração, e redução na porosidade e condutividade hidráulica. Esses efeitos negativos perduraram até o final

da rotação seguinte. O espaçamento ideal é aquele que proporciona a máxima produtividade de madeira aproveitável para produção do produto final, com menor custo e melhor qualidade dos fatores de produção. O objetivo do segundo capítulo foi avaliar o efeito de diferentes espaçamentos e arranjos de plantio na produtividade e na matéria orgânica do solo (MOS) de um LV e um LA em clones distintos por região aos 11 anos de idade. Os tratamentos consistiram de um “design” em parcelas subdivididas, sendo 2 x 5 no LV: 2 clones (1213 e 7434); e 5 espaçamentos [6 m² planta⁻¹ (3 x 2 m); 9 m² planta⁻¹ (3 x 3 m); 10 m² planta⁻¹ (3,6 x 2,8 m); 12 m² planta⁻¹ (4 x 3 m e 6 x 2 m)] e 2 x 6 no LA: 2 clones (1213 e 57); e 6 espaçamentos [6 m² planta⁻¹ (3 x 2 m); 9 m² planta⁻¹ (3 x 3 m); 10 m² planta⁻¹ (4,0 x 2,5 m); 12 m² planta⁻¹ (4 x 3 m e 6 x 2 m); 15 m² planta⁻¹ (6 x 2,5 m)]. Em ambos os sítios os clones foram alocados à parcela principal e os espaçamentos na subparcela. O espaçamento de 6 m² planta⁻¹ promoveu maior incremento médio anual de celulose (IMAcel). Espaçamentos maiores apresentaram menor produção de serapilheira. Os teores de Carbono Orgânico Total (COT) e das frações lábeis não foram influenciados pelo espaçamento. É possível manter produtividade em rotações mais longas. A matéria orgânica está diretamente relacionada com a qualidade do solo e a sustentabilidade dos sistemas de produção em longo prazo. Nos sítios florestais a quantidade e a qualidade do resíduo que permanece na área influenciarão a entrada de C, sua taxa de decomposição e transferência para as frações da MOS e a sustentabilidade destes sistemas de produção. A tendência de demanda crescente pela remoção de resíduos de colheita de eucalipto para a produção de energia tem gerado preocupação, pois o maior retorno econômico com a remoção excessiva desses resíduos da área pode comprometer a MOS. Além disso, evidências na literatura sugerem que há um nível de saturação de C baseado nos processos físico-químicos que protegem ou estabilizam os compostos orgânicos do solo. O objetivo do terceiro capítulo foi avaliar a estabilização do resíduo de colheita de eucalipto marcado com ¹³C aplicado separadamente por componente da planta (folhas, galhos, raízes, cascas e lenho) em cinco solos de textura muito argilosa e mineralogia distinta, provenientes de mata nativa para cinco níveis de déficit de saturação de C do solo (DSC). Os tratamentos resultaram de um esquema fatorial 5 x 5 x 6: cinco solos de regiões distintas; cinco profundidades (0-10; 10-20; 20-40; 40-60; 60-100 cm); e cinco resíduos de eucalipto (folhas, galhos, raízes, cascas e lenho) mais um testemunha sem resíduo. A eficiência de conversão do resíduo em MOS é maior em solos com maior DSC. A eficiência de

estabilização do C do resíduo adicionado é maior na folha e casca, e é menor em Latossolo com caráter caulínítico em comparação a Latossolos oxidicos.

ABSTRACT

JESUS, Guilherme Luiz de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2012. **Soil compaction, plant spacing, crop residues and carbon saturation deficit in soil organic matter under eucalypt plantation.** Adviser: Ivo Ribeiro da Silva. Co-advisers: Roberto Ferreira de Novais and Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.

The Brazilian forestry sector has been expanding very fast in recent years in the face of growing demand for forest products. Comparing with 2009, the area of forest plantations in 2010 increased 3.2% reaching 4,752,806 ha occupied by eucalypt plantations in Brazil (ABRAF, 2011). The ever reducing workforce has led to intensification of mechanized activities in the forest sector, especially at the harvest operation. However, there are growing concerns that excessive machine trafficking may lead to yield losses due to compaction. The number of passes, types of wheels and high soil moisture during operations aggravates the compression process, these impacts and alternatives to reduce them deserve efforts to be better known. This study evaluates the impact of different traffic intensities of the *forwarder* and the effect of different conditions of eucalyptus crop residues at the end of subsequent rotation on productivity, soil physical properties and organic matter of an Oxisol, located in São João Evangelista - MG and an Oxisol, located in Belo Oriente – MG. The treatments consisted in a 2 x 3 factorial scheme: two or eight machine passes on crop residue without bark (SC), with bark (CC), or without residue (SR). The loss of productivity by soil compaction caused by the forwarder traffic is mitigated by the permanence of crop residues especially with the maintenance of bark in the area. The residues removal, particularly when the bark is removed, leads to reduction in total organic carbon and more labile C and N fractions from the soil. The forwarder traffic during the harvest of the previous rotation of eucalyptus on soil without residues promotes losses in soil physical quality, with increased density and penetration resistance, and reduction in porosity and hydraulic conductivity. These negative effects lasted until the end of the current rotation. The ideal spacing is the one that provides the highest wood productivity usable for production of end product with lower cost and with no wasted space. The present study evaluates the effect of different spacings and planting arrangements in productivity and SOM of Oxisols planted with different clones per region at the age of 11 years. There were 10 treatments in a split-plot design in the Oxisol at São João Evangelista: two clones

(1213 and 7434) and 5 spacings [6 m² plant⁻¹ (3 x 2 m), 9 m² plant⁻¹ (3 x 3 m), 10 m² plant⁻¹ (3.6 x 2.8 m), 12 m² plant⁻¹ (4 x 3 m and 6 x 2 m)]. In the Oxisol at Belo Oriente, the 12 treatments also were in a split-plot design with two clones (1213 and 57), and 6 spacings [6 m² plant⁻¹ (3 x 2 m), 9 m² plant⁻¹ (3 x 3 m); 10 m² plant⁻¹ (4.0 x 2.5 m), 12 m² plant⁻¹ (4 x 3 m and 6 x 2 m); 15 m² plant⁻¹ (6 x 2.5 m)]. In both sites the clones were allocated to the mains plot and the spacings to the split-plot. The spacing of 6 m² plant⁻¹ promoted higher cellulose average annual increment (IMAccl). Larger spacings had lower litter production. The Total Organic Carbon contents and labile fractions were not affected by spacing. It is possible to maintain the productivity in longer rotations. The organic matter is directly related with the soil quality and sustainability of long term production systems. In forest sites both quantity and quality of residue remaining in the field will influence the C input, its decomposition rate and transference to the SOM fractions. The increasing demand for the removal of eucalypt crop residues for energy production has raised concerns since the greatest economic return with the excessive removal of residues from the area may compromise the SOM. Furthermore, evidences in the literature suggest that there is a C saturation level based on physical and chemical processes to protect or stabilize the soil organic compounds. The present study evaluates the stabilization of eucalypt harvest residues labeled with ¹³C applied separately by plant components in five clayey soils with distinct mineralogy from native forest to five levels of soil Carbon Saturation Deficit (CSD) using the soil depths. The treatments consisted of a 5 x 5 x 6 factorial combination: five soils from distinct regions, five soil depths (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-100 cm) and five eucalypt residues (leaves, twigs, roots, bark and wood) plus a control without residue addition. The efficiency of conversion of eucalypt residues in SOM is larger in soils with higher CSD. The efficiency of C stabilization of added residues is higher for leaves and bark, and is lower in soil with a more kaolinitic character in comparison to more oxidic Oxisols.

CAPÍTULO 1

PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO, PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA INFLUENCIADAS PELA INTENSIDADE DE TRÁFEGO E RESÍDUOS DE COLHEITA

RESUMO

O número de passadas das máquinas, tipos de rodados e a alta umidade do solo durante as operações de colheita agravam o processo de compactação, devendo-se conhecer estes impactos e quais alternativas para reduzi-los. O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto de diferentes frequências de tráfego do *forwarder* e o efeito de condições distintas de resíduos da colheita do eucalipto ao fim da rotação subsequente na produtividade, nas propriedades físicas do solo e da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho (LV), localizado em São João Evangelista – MG e um Latossolo Amarelo (LA), localizado em Belo Oriente - MG. Os tratamentos consistiram de um esquema fatorial 2 x 3, sendo: duas ou oito passadas na entrelinha sobre resíduo da colheita sem casca (SC); com casca (CC), ou sem resíduo (SR). A perda de produtividade dos plantios pela compactação do solo proveniente das passadas do *forwarder* é atenuado com a permanência dos resíduos da colheita especialmente com a manutenção da casca na área. A remoção de resíduo, particularmente quando há remoção da casca, leva a redução do C orgânico total e de frações mais lábeis de C e N do solo. O tráfego do *forwarder* na colheita do eucalipto da rotação anterior sobre solo sem resíduos promove perdas na qualidade física do solo, com aumento da densidade e resistência a penetração, e redução na porosidade e condutividade hidráulica. Esses efeitos negativos perduraram até o final da rotação seguinte.

Palavras-chave: compactação do solo, resistência à penetração, Carbono lábil, *forwarder*

SUMMARY

The number of machine passes, types of wheels and high soil moisture during operations aggravates the compression process, these impacts and alternatives to reduce them should be known. This study evaluates the impact of different traffic intensities of the *forwarder* and the effect of different conditions of eucalyptus crop residues at the end of subsequent rotation on productivity, soil physical properties and organic matter of an Oxisol, located in São João Evangelista - MG and an Oxisol located in Belo Oriente – MG. The treatments consisted in a 2 x 3 factorial scheme: two or eight machine passes on crop residue without bark (SC), with bark (CC), or without residue (SR). The crops loss of productivity by soil compaction caused by the forwarder traffic is mitigated by the permanence of crop residues especially with the maintenance of bark in the area. The residues removal, particularly when the bark is removed, leads to reduction in total organic carbon and more labile C and N fractions from the soil. The forwarder traffic in the harvest of the previous rotation of eucalyptus on soil without residues promotes losses in soil physical quality, with increased density and penetration resistance, and reduction in porosity and hydraulic conductivity. These negative effects lasted until the end of the next rotation.

Keywords: soil compaction, penetration resistance, labile carbon, *forwarder*

INTRODUÇÃO

Uma intensa mecanização do setor florestal a partir da década de 90 tem ocorrido para atender a demanda do mercado a custos competitivos diante da crescente dificuldade de mão-de-obra. Por se tratar em sua maioria de máquinas de grande porte, principalmente na colheita de madeira, têm-se como consequência direta das operações florestais alterações em diversas propriedades físicas e mecânicas do solo (Silva et al., 2007).

A compactação do solo reduz o espaço poroso e a infiltração de água (Reichert et al., 2007). O aumento nos níveis de compactação do solo pode por sua vez interferir negativamente na produtividade (Dias Júnior, 1999; Cavichiolo et al., 2005; Reichert et al., 2009), devido ao baixo desenvolvimento do sistema radicular (Marchão et al., 2007) pelo impedimento mecânico, o qual resulta em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes. A compactação do solo tem se destacado em nível mundial como sendo um dos fatores limitantes da qualidade física do solo, prejudicando a obtenção de maiores índices de produtividade (Alakukku e Elomen, 1994), e é também apontada como um dos principais fatores da degradação de solos agrícolas (Canillas e Salokhe, 2002).

De acordo com características edáficas como, por exemplo, textura e mineralogia do solo, os impactos relacionados ao tráfego de máquinas podem potencializar o processo de compactação do solo. Da mesma forma, o número de passadas das máquinas, os tipos de rodados utilizados e a alta umidade do solo durante as operações agravam o processo de compactação (Seixas, 2000; Lopes et al., 2006; Lopes et al., 2011).

O módulo de colheita de madeira utilizado condiciona o percentual da área que será atingida pelo deslocamento das máquinas (Seixas & Souza, 2007). Assim, a utilização de *feller-buncher* e *skidder* na colheita florestal implica que pelo menos uma vez, praticamente, toda área sofrerá tráfego e distúrbio do solo pelo arraste das árvores até a borda do talhão. Já no módulo *harvester – forwarder*, o tráfego ficará concentrado nos ramais de extração de madeira, com a área trafegada dependendo da distância entre eles (Fenner, 2002).

O *forwarder* é uma máquina projetada para o baldeio da madeira já cortada, de dentro da floresta para a periferia dos talhões, de modo a evitar o tráfego dos veículos de transporte dentro da floresta. No entanto, segundo Seixas & Souza

(2007), 80 % do incremento da compactação de um solo ocorreu após as cinco primeiras passadas de um *forwarder*. Silva et al., (2010) estudando o efeito do número de passadas de um *forwarder* nas regiões de Belo Oriente e São João Evangelista verificaram que o maior número de passadas causou maior compactação do solo, sendo essa minimizada nas condições em que foram mantidos os resíduos galhada mais casca e galhada no ato da colheita.

Neste sentido, é necessário entender e desenvolver estratégias de manejo que visem reduzir o efeito da compactação atuando sobre as causas deste problema.

O objetivo do presente estudo foi avaliar o impacto de diferentes intensidades de tráfego do *forwarder* e o efeito de condições distintas de deposição de resíduos da colheita do eucalipto ao fim da rotação na produtividade, nas propriedades físicas do solo e da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho oxidico e um Latossolo Amarelo caulinitico na rotação seguinte.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área de estudo

Este estudo foi realizado em áreas da Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA) num Latossolo Vermelho (LV), textura muito argilosa (75 % de argila), oxidico, localizado no município de São João Evangelista, MG, a 18°34'12"S e 42°52'53"W, com altitude de 860 m, e num Latossolo Amarelo (LA), textura argilosa (59 % de argila), caulinitico, no município de Belo Oriente, MG, a 19°18'23"S e 42°25'31"W com altitude de 300 m.

A colheita florestal foi realizada em janeiro de 2005 com o uso de motosserra, e a extração da madeira foi feita com *forwarder* (marca Valmet, modelo 636 S), com tara de 11,9 t, carregado com 9 m³ de madeira (densidade básica de 480 kg m⁻³).

Os tratamentos consistiram de um esquema fatorial 2 x 3, sendo: tráfego do *forwarder* duas ou oito vezes sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo da colheita do eucalipto com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR). Para a comparação do efeito das passadas do *forwarder* nas propriedades físicas e na matéria orgânica, amostras na entrelinha de tráfego foram coletadas e consideradas como zero passadas. As parcelas eram de 36 m de comprimento e 4 m de largura, com 144 m² de área, sendo a linha de 12 plantas a parcela total e 10 plantas úteis. O

espaçamento entre as árvores foi de 3 x 3,33 m. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com duas repetições.

Após a colheita realizou-se o plantio na entrelinha no mês de maio de 2005 em Belo Oriente com o clone 1213, híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* e em São João Evangelista instalado em agosto de 2005 com o clone 911, híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis*. A adubação de plantio, de cobertura e de fonte de Ca e Mg foram as mesmas e aplicadas nas mesmas épocas para todos os tratamentos.

Coleta e análises de amostras de solo

Amostras de solo foram coletadas quando as árvores estavam com 5,88 anos de idade em Belo Oriente e 5,61 anos de idade em São João Evangelista.

Para avaliação da qualidade física do solo, em cada parcela de cada bloco foram coletadas amostras com anéis metálicos de 100 cm³, sendo seis amostras (três na camada de 2,5-7,5 cm e três na camada de 12,5-17,5 cm de profundidade do solo) em cada condição de tráfego do *forwarder* (zero, duas, ou oito passadas). Nestas amostras determinaram-se, em laboratório, a condutividade hidráulica em meio saturado (K_0) com permeâmetros de carga constante (Ferreira, 1999); microporosidade após tensão de 6 kPa; densidade do solo (D_s) pelo método do anel volumétrico; densidade de partículas (D_p) pelo método do balão volumétrico; porosidade total (PT) pela equação $PT=1-(D_s/D_p)$; e macroporosidade dada pela diferença entre PT e microporosidade.

A resistência à penetração (RP) foi determinada até a profundidade de 60 cm de solo, por meio do uso de um penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF (Stolf et al., 1983). Dentro de cada tratamento foram realizadas cinco em cada condição de tráfego do *forwarder* (zero, duas, ou oito passadas). Amostras de solo também foram coletadas, acondicionadas em latas de alumínio, hermeticamente fechadas e levadas ao laboratório para determinação da umidade do solo nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade.

Para as análises químicas do solo foram coletadas amostras na camada de 0-20 cm, sendo cinco amostras simples para uma amostra composta. Para cada parcela de disposição de resíduo e em cada profundidade coletou-se uma amostra composta em cada condição de tráfego do *forwarder* (zero, duas, ou oito passadas). As amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneiras de 2 mm de malha, homogeneizadas e, posteriormente, submetidas às análises químicas (Quadros 1, 2,

3). Foram determinados pH em água; Al, Ca e Mg trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; P e K extraídos pelo Mehlich-1, de acordo com método descrito por Defelipo & Ribeiro (1997). Nos extratos, os teores de P foram determinados por colorimetria (Braga & Defelipo, 1974), os de K por fotometria de chama e os de Ca, Mg e Al por espectrofotometria de absorção atômica (AOAC, 1975). Os teores de Fe, Mn, Zn, e Cu foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, após extração com Mehlich-1. O P remanescente foi determinado de acordo com Alvarez V. et al. (2000). A caracterização granulométrica foi realizada seguindo-se a metodologia proposta por Ruiz (2005). Para determinação da classe mineralógica dos solos realizou-se ataque sulfúrico conforme Embrapa (1997, 2006).

O Carbono Orgânico Total (COT) do solo foi determinado segundo metodologia proposta por Yeomans & Bremner (1988), sendo a dosagem feita pela titulação do dicromato remanescente da oxidação.

O C lábil (CL) foi quantificado por meio da oxidação com KMnO₄ (33 mmol L⁻¹) como proposto por Blair et al. (1995) e modificado por Shang & Tiessen (1997). O N lábil (NL) foi determinado segundo Sahrawat (1982) em que se utilizou 10 mL do extrato do CL e 25 mL de NaOH 10 mol L⁻¹ e dosado por titulação (HCl 0,01 mol L⁻¹) após destilação Kjeldahl. O nitrogênio total (NT) foi quantificado nas amostras de solo sendo dosado por titulação após destilação Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982).

Medição, coleta e análise do material vegetal

O diâmetro do tronco à altura de 1,3 m (*dap*) e a altura de todas as árvores da área útil da parcela foram medidos aos 2,88 anos e 5,88 anos em Belo Oriente e aos 2,61 anos e 5,61 anos em São João Evangelista, determinando, assim o incremento médio anual (IMA, m³ ha⁻¹ ano⁻¹) com base nas equações ajustadas: $\hat{y} = 0,004761 + 0,000033127.(dap^2).Altura$, no caso de São João Evangelista e $\hat{y} = 0,014562 + 0,0000323.(dap^2).Altura$, no caso de Belo Oriente (CENIBRA, dados não publicados).

Amostras de serapilheira foram coletadas em cada parcela. Para tanto, coletaram-se quatro amostras simples (duas nas linhas e duas nas entrelinhas de plantio), para compor uma amostra representativa da parcela, utilizando um gabarito de 0,5 m x 0,5 m na última idade avaliada. Após determinação da massa de matéria fresca, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72

h, pesadas para determinação da massa seca e moídas separadamente em moinho tipo Wiley equipado com peneira de 1 mm.

Os dados referentes às características dendrométricas, produção de massa seca de serapilheira, propriedades físicas e matéria orgânica do solo foram submetidos à análise de variância. Posteriormente, realizou-se o desdobramento dos graus de liberdade de tratamentos e, por meio de teste de médias avaliou-se o efeito do tráfego do *forwarder* no incremento médio anual e produção de massa seca de serapilheira adotando-se o nível de significância de até 10 %. Para a avaliação do efeito do manejo do resíduo da colheita ao final da rotação anterior foram estabelecidos os seguintes contrastes: (C1: Solo Sem Resíduo (SR) vs Solo com Resíduo de Colheita Sem Casca (SC) e Solo com Resíduo de Colheita com Casca (CC) na mesma quantidade de passadas do *forwarder* e profundidade; C2: Solo com Resíduo de Colheita Sem Casca (SC) vs. Solo com Resíduo de Colheita com Casca (CC) na mesma quantidade de passadas do *forwarder* e profundidade) adotando-se o nível de significância de até 10 %. Da mesma forma, para avaliar o efeito do tráfego do *forwarder* nas propriedades físicas e matéria orgânica do solo foram estabelecidos os seguintes contrastes: (C3: sem passadas vs. com passadas no mesmo tipo de resíduo e profundidade (2 e 8); C4: 2 passadas vs. 8 passadas no mesmo tipo de resíduo e profundidade) adotando-se o nível de significância de até 10 %..

Utilizou-se para o processamento dos dados o programa estatístico STATISTICA versão 8.0 (StatSoft, Inc., 2007).

RESULTADOS

Produtividade florestal e serapilheira

O incremento médio anual (IMA) representa a produtividade da floresta. O IMA médio dos tratamentos em São João Evangelista aos 2,61 anos foi de 27,2 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e aos 5,61 anos de 42,7 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Em Belo Oriente, o IMA médio aos 2,88 anos foi de 32,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e aos 5,88 anos de 33,6 m³ ha⁻¹ ano⁻¹.

Em São João Evangelista e Belo Oriente, não houve efeito do número de passadas do *forwarder* no IMA nas duas idades estudadas (Figuras 1a, 1b) para a mesma disposição de resíduo ($p > 0,20$). Porém, já na medição realizada em idade precoce em São João Evangelista houve diferença no IMA do tratamento sem resíduo da colheita (SR) e dos tratamentos com resíduo, mesmo com 2 passadas do

forwarder ($p < 0,10$), permanecendo a diferença aos 5,61 anos (Figura 1a, contraste 1); sendo 41 % maior nos tratamentos com resíduo com 2 passadas e 33 % maior nos tratamentos com resíduo com 8 passadas considerando a última idade avaliada (Figura 1a). Embora em Belo Oriente na idade mais avançada exista uma tendência de menor IMA no tratamento SR em relação aos tratamentos com resíduo, não se observou diferenças ($p > 0,10$) (Figura 1b, contraste 1).

Em São João Evangelista, na condição 8 passadas no tratamento em que houve a manutenção de resíduo de colheita com casca (CC) o IMA foi 23 % superior que aquele do tratamento com manutenção de resíduos da colheita sem casca (SC), em ambas as idades (Figura 1a, contraste 2). No entanto, diferenças não foram observadas com 2 passadas ao se comparar os tratamentos CC e SC nas duas idades avaliadas ($p > 0,10$) (Figura 1a, contraste 2). Em Belo Oriente o IMA não diferiu entre os tratamentos CC e SC ($p > 0,10$) em ambas as idades avaliadas, independente do número de passadas do *forwarder* (Figura 1b, contraste 2).

Ao final da rotação a massa seca de serapilheira (média geral) foi $10,7 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 2a,b). O tratamento CC apresentou 11,5 % menos massa seca de serapilheira que o tratamento SR, independente da região de estudo e do número de passadas.

A massa seca de serapilheira não diferiu entre o número de passadas em ambas regiões do estudo ($p > 0,10$) (Figura 2a). Com relação à disposição de resíduo, apenas na região de São João Evangelista e no tratamento com 8 passadas, a massa seca de serapilheira do tratamento SR foi 10,3 % maior ($p < 0,10$) que os tratamentos com resíduo (CC e SC), observando-se a mesma tendência com 2 passadas ($p = 0,139$) (Figura 2b, contraste 1). Nesta mesma região, diferenças não foram observadas entre o tratamento CC e os tratamentos SC (2 ou 8 passadas) (Figura 2b, contraste 2).

Propriedades físicas do solo

A condutividade hidráulica média (geral) foi de $55,2 \text{ cm s}^{-1}$ e de $33,4 \text{ cm s}^{-1}$ em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente. A disposição de resíduo na condição com 2 passadas foi capaz de atenuar o efeito deletério da colheita em São João Evangelista uma vez que valores maiores da condutividade hidráulica foram observados nos tratamentos SC e CC (Quadro 4, contraste 1). O tratamento CC apresentou valores de K_0 97 % superiores em relação ao tratamento SC na camada de 10-20 cm em São João Evangelista (Quadro 4, contraste 2). A condutividade hidráulica dos tratamentos amostrados na linha de tráfego foram, em

média, 64,8 % e 21,7 % do valor obtido para os tratamentos amostrados na entrelinha de tráfego em São João Evangelista e Belo Oriente (Quadros 4 e 5, contraste 3), sendo não significativo apenas na camada de 0-10 cm em São João Evangelista. Porém, com exceção do tratamento CC em que a condição com 2 passadas apresentou maior condutividade hidráulica em São João Evangelista, diferenças nos tratamentos com 2 e 8 passadas não foram observadas (Quadros 4 e 5, contraste 4).

A microporosidade média (geral) foi de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em São João Evangelista e $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Belo Oriente. De maneira geral, esta variável foi pouco sensível ao efeito da disposição do resíduo da colheita em ambas as regiões ($p > 0,10$) (Quadros 4 e 5, contrastes 1 e 2). O valor da microporosidade das amostras de solo coletadas na linha de tráfego foi 16,1 % maior em relação às coletadas na entrelinha de tráfego em Belo Oriente e 13,5 % em São João Evangelista (Quadros 4 e 5, contraste 3) ($p < 0,10$). Os tratamentos com 8 passadas e CC apresentaram maiores valores de microporosidade que com 2 passadas em ambas as regiões e profundidades (Quadros 4 e 5, contraste 4), fato também observado para a condição SR em São João Evangelista.

A macroporosidade média em São João Evangelista foi de $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que em Belo Oriente a média geral encontrada foi de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Observou-se que, na camada de 10-20 cm na condição com 8 passadas, o tratamento SR apresentou menores valores de macroporosidade em relação aos tratamentos CC e SC em São João Evangelista (Quadros 4 e 5, contraste 1). Ainda nesta mesma camada com 2 passadas, o tratamento CC apresentou maiores valores de macroporosidade (Quadros 4 e 5, contraste 2). De maneira geral, a linha de tráfego apresentou valores 25 % e 36 % menores de macroporosidade que da entrelinha em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente ($p < 0,10$) (Quadros 4 e 5, contraste 3). Este efeito foi mais evidente na condição de 8 passadas em relação à 2 passadas (Quadros 4 e 5, contraste 4).

A porosidade total em São João Evangelista foi de $0,68 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e em Belo Oriente de $0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Com relação ao efeito do resíduo, resultados consistentes foram observados apenas na camada de 10-20 cm de profundidade em São João Evangelista, onde se observou menores valores de porosidade ($p < 0,10$) nos solos dos tratamentos SR em relação aos CC e SC tanto na condição de 2 quanto de 8 passadas (Quadro 4, contraste 1). Nesta mesma região e camada, os solos dos tratamentos CC apresentaram maiores valores de porosidade em relação ao SC (Quadro 4, contraste

2). Este mesmo resultado foi encontrado apenas na condição de 2 passadas em Belo Oriente (Quadro 5, contraste 2). Ainda em Belo Oriente, também se observou menor valor de porosidade na condição SR com 8 passadas na profundidade de 10-20 cm comparativamente aos tratamentos com resíduo (Quadro 5, contraste 1). De maneira geral, a porosidade total foi 4,6 % e 8,2 % menor na condição com passadas que sem passadas em São João Evangelista e Belo Oriente (Quadros 4 e 5, constraste 3). Porém, na camada onde se espera maior efeito da compactação, não se observou diferenças no tratamento CC ao se comparar condição de passadas e sem passadas. Valores menores foram observados na condição de 8 passadas em Belo Oriente, com exceção do tratamento SC (Quadro 5, contraste 4) e em São João Evangelista apenas no tratamento CC.

A densidade do solo (Ds) média (geral) foi de $0,93 \text{ g cm}^{-3}$ em São João Evangelista e de $1,20 \text{ g cm}^{-3}$ em Belo Oriente. Em São João Evangelista, os solos dos tratamentos SR apresentaram maiores Ds que dos tratamentos com resíduo (Quadro 4, contraste 1). Porém, na camada de 10-20 cm, o tratamento CC apresentou menor Ds que o tratamento SC na condição de 8 passadas. Em Belo Oriente, não se observou diferenças para o efeito da disposição do resíduo na Ds (Quadro 5, contrastes 1 e 2). Em São João Evangelista, observou-se maiores valores de Ds na camada de 10-20 cm nos tratamentos com passadas em relação aos tratamentos sem passadas, exceção para o tratamento CC e, na camada de 0-10 cm, a Ds foi maior apenas na condição com passadas no tratamento SR (Quadro 4, contraste 3). Em Belo Oriente, os tratamentos sem passadas apresentaram menores valores de Ds independente da disposição de resíduo, exceção apenas para o tratamento CC na camada de 0-10 cm, onde não se observou diferença (Quadro 5, contraste 3). Nesta mesma região, a Ds foi maior na condição de 8 passadas em relação à 2 passadas independentemente do tipo de resíduo disposto (Quadro 5, contraste 4). Em São João Evangelista não se observou diferença (Quadro 4, contraste 4).

A resistência à penetração mecânica no solo (RP) diferiu entre o número de passadas e tipo de resíduo. Os solos dos tratamentos SR apresentaram maiores valores de resistência à penetração, sendo valores ainda maiores com maior número de passadas (Figuras 3 e 4). Além disso, verificou-se que a camada mais afetada pela passagem do *forwarder* foi a de 10 a 20 cm de profundidade em ambas as regiões. A umidade do solo era maior em São João Evangelista.

Frações da matéria orgânica do solo

Os teores de Carbono Orgânico Total (COT) na profundidade de 0-20 cm foram de 43,7 g kg⁻¹ em São João Evangelista e 20,7 g kg⁻¹ em Belo Oriente. Considerando a disposição de resíduos, para a região de São João Evangelista se observou que os teores de COT dos tratamentos foram menores que dos tratamentos com resíduo apenas na profundidade de 10-20 cm e na condição de maior número de passadas (Quadro 6, contraste 1). O mesmo foi observado em Belo Oriente apenas no tratamento com 8 passadas na camada de 0-10 cm (Quadro 7, contraste 1). Não houve diferenças no COT ($p>0,10$) em ambas as regiões ao se comparar o tratamento de disposição de resíduo sem casca com o tratamento de resíduo com casca (Quadros 6 e 7, contraste 2). Em média, os solos dos tratamentos com 8 passadas apresentaram COT 12,1 % e 19,1 % superiores que naqueles com 2 passadas, em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente, sendo este resultado mais consistente na camada de 0-10 cm de profundidade (Quadros 6 e 7, contraste 4). No entanto, não se observou diferenças entre tratamentos sem passadas comparativamente aos tratamentos com passadas (Quadros 6 e 7, contraste 3).

Os teores de C lábil (CL) na profundidade de 0-20 cm foram de 2,77 g kg⁻¹ em São João Evangelista e de 2,60 g kg⁻¹ em Belo Oriente. Na condição de 8 passadas, observou-se que os tratamentos com resíduo apresentaram maiores teores de CL comparativamente ao tratamento SR em ambas as regiões (Quadros 6 e 7, contraste 1), fato também observado na condição de 2 passadas em São João Evangelista. Tanto na camada de 0-10 cm quanto naquela de 10-20 cm (em Belo Oriente e São João Evangelista) os teores de CL do solo não apresentaram padrão de resposta consistente em relação ao efeito da casca (Quadros 6 e 7, contraste 2). Com exceção dos tratamentos SC (0-10 cm) e CC (10-20 cm) em São João Evangelista, diferenças não foram observadas nos tratamentos sem passadas em relação aos com passadas (Quadros 6 e 7, contraste 3) e não se observou consistência ao se comparar 2 e 8 passadas para CL (Quadros 6 e 7, contraste 4).

A contribuição relativa do CL em relação ao COT foi de 12,5 % em Belo Oriente, o dobro em relação à São João Evangelista (6,3 %) (Quadros 6 e 7). Na região de São João Evangelista apenas 4,8 % do COT do tratamento SR e 2 passadas (0-10 cm) estava na fração CL, enquanto que 7 % do COT estava na fração CL nos tratamentos com resíduo (Quadro 6, contraste 1). Diferenças não foram observadas entre os tratamentos CC e SC ($p>0,10$) independentemente do número de passadas,

profundidade e local de coleta em ambas as regiões (Quadros 6 e 7, contraste 2). Apenas o tratamento SC apresentou menor contribuição relativa do CL no tratamento sem passada em relação aos com passadas na camada de 0-10 cm (Quadro 6, contraste 3).

O teor médio de N total (NT) foi de 2,66 g kg⁻¹ em São João Evangelista e de 1,47 g kg⁻¹ em Belo Oriente. Na condição 8 passadas, os tratamentos SC e CC apresentaram maiores teores de NT em relação ao SR em Belo Oriente (Quadro 7, contraste 1). Porém, na condição de 2 passadas, o tratamento CC apresentou maior teor de NT em relação ao SC em ambas profundidades avaliadas (Quadro 7, contraste 2). Em Belo Oriente, maiores teores de NT nos tratamentos com passadas foram observados na camada de 10-20 cm, exceção do tratamento sem resíduo (Quadro 7, contraste 3), sendo valores maiores nos tratamentos com 8 passadas nas situações sem resíduo e resíduo com casca (Quadro 7, contraste 4).

Em relação ao teor de NL e da relação de NL e NT, de modo geral, não se observou diferenças para passadas e tipo de resíduo em ambas as regiões (Quadros 6 e 7).

DISCUSSÃO

Os resultados do presente estudo indicam que o tráfego de forwarder, especialmente com maior número de passadas e quando da não manutenção dos resíduos da colheita de eucalipto no talhão, resultam em perdas substanciais de produtividade. Incrementos médios anuais significativamente menores devido ao tráfego foram observados já nos primeiros dois anos e se mantiveram até a idade de colheita, com respostas de maior magnitude no solo oxidico de São João Evangelista do que no solo caulínico de Belo Oriente. Seixas & Souza (2007), avaliando o efeito da compactação do solo devido ao tráfego de trator mais carreta (massa total de 8 t) em solo arenoso, não observaram diferença ($p > 0,05$) entre os tratamentos com até 20 passadas na produtividade ao final de uma rotação de sete anos de *E. grandis*. Contudo, observou-se menor valor numérico a partir de 5 passadas. Dedecek & Gava (2005) observaram redução de produtividade do eucalipto de até 66 % aos 7 anos em rebrota nas linhas com tráfego (caminhão toco). Silva et al. (2006) verificaram que a produção de massa seca de raízes, massa seca total e densidade de raízes de mudas de eucalipto foram reduzidas pela compactação do solo na condição

de maior umidade ($0,20 \text{ kg kg}^{-1}$) em Latossolo Vermelho-Amarelo, atingindo 40, 30 e 39 % de redução, respectivamente. Porém, em baixos valores de umidade não houve efeito da compactação na produção do eucalipto, sendo a umidade do solo por ocasião do tráfego fator importante para que a compactação do solo converta em perda de produtividade, uma vez que a mesma facilita o ajuste de partículas e reduz a resistência dos agregados à deformação física (Silva et al., 2006). Os mesmos autores não observaram efeitos da compactação na produção de massa seca total e de raízes de mudas em um Latossolo Amarelo, mesmo solo do presente estudo. Vale ressaltar que, por ocasião da aplicação dos tratamentos (passadas do *forwarder*) a umidade média do solo em São João Evangelista era de $0,36 \text{ kg kg}^{-1}$ e de $0,26 \text{ kg kg}^{-1}$ em Belo Oriente, o que pode ter acentuado as respostas aos tratamentos na região de São João Evangelista.

Apesar da maior produtividade (IMA) obtida nos tratamentos com maior quantidade de resíduos deixada na área por ocasião da aplicação dos tratamentos (SC e CC), observou-se maior acúmulo de serapilheira ao final da rotação no tratamento SR em São João Evangelista, tendência também observada em Belo Oriente. Considerando que, em média, 12 t/ha de casca são deixados no solo na colheita florestal (Neves, 2000) e que, no presente estudo a massa seca da serapilheira foi menor no tratamento CC, pode se sugerir que a taxa de decomposição do resíduo com casca é maior comparativamente ao resíduo sem casca. Segundo Souza (2012) a manutenção da casca acelera a decomposição dos resíduos. Uma hipótese alternativa, no entanto, é que a maior compactação e conseqüente redução da porosidade devido ao tráfego sobre o solo nos tratamentos SR reduziu os fluxos de água (K_0), dificultando as trocas gasosas do solo com a atmosfera. Em especial, redução na difusão de O_2 é esperada. Esse ambiente menos oxidativo no solo causado pela compactação reduz a atividade microbiana (Silva et al., 2011), o que pode ter contribuído para a menor taxa de decomposição da serapilheira depositada no solo do tratamento SR no presente estudo. Adicionalmente, tal padrão de resposta pode também explicar os maiores teores de COT observados nos solos onde foi feito maior número de passadas. No entanto, o N pode ter limitado a conversão de C do resíduo em MOS no tratamento com a manutenção de casca devido sua alta relação C/N (Demolinari, 2008; Souza, 2012), sendo o motivo pelo qual, no geral, os teores de COT do tratamento CC foram menores que SC. Os maiores teores de NT nos solos dos tratamentos CC e SC em relação ao solo dos tratamentos SR evidencia a

importância da manutenção do resíduo como fonte de N. Do mesmo modo, de maneira geral, a manutenção de resíduo apresentou tendência de aumento dos teores de CL e COT, evidenciando que a maior entrada de C no sistema leva a maiores teores de matéria orgânica do solo neste caso.

A maior labilidade da matéria orgânica observada em Belo Oriente (CL/COT) pode ser explicada pelo menor teor de COT em Belo Oriente, que é menos da metade do COT do solo de São João Evangelista. Do mesmo modo, o teor médio de N total (NT) em Belo Oriente representa pouco mais da metade do NT de São João Evangelista. Assim, era de se esperar maiores respostas aos tratamentos com resíduo no Latossolo Amarelo de Belo Oriente na fração dinâmica da matéria orgânica, o que não se constatou. Uma das possíveis razões para essa resposta seria a rápida decomposição de compostos carbonados mais lábeis, pois as taxas de decomposição da MOS nessa região mais baixa e mais quente (Belo Oriente) são praticamente o dobro das observadas na região mais alta e de clima mais ameno (São João Evangelista) (Lima et al., 2006).

As características físicas e mecânicas do solo na camada de 10-20 cm foram mais influenciadas pelos tratamentos que aquela de 0-10 cm. Este efeito pode ser explicado pelos maiores teores de MOS na camada mais superficial, uma vez que a MOS aumenta a resistência do solo a compactação por aumentar a força de união entre as partículas e agregados, aumentando assim a elasticidade do solo (Braida et al., 2008).

O fato de se ter observado efeito nas características físicas dos solos com 8 passadas, deixa claro que o maior número de passadas no ato da colheita leva a maior compactação do solo e que estes efeitos perduram até ao fim da rotação seguinte. Em termos gerais, a condutividade hidráulica na linha de tráfego foi de 43 % que da obtida na entrelinha (0 passadas). Esta menor condutividade está associada ao aumento da D_s pela redução de macroporos, bem como aumento da resistência à penetração do solo que resultará na menor atividade microbiana e, principalmente, menor desenvolvimento radicular.

Os valores de D_s considerados prejudiciais estão em torno de 15 a 20 % maiores que o valor inicial da densidade média do solo (Seixas, 2000), incrementos de D_s próximos aos encontrados neste estudo ao se considerar a média de passadas em relação à condição sem passadas (15,6 % e 12,1 % em Belo Oriente e São João Evangelista, respectivamente). Fernandes et al. (1997) estudando o efeito do número

de passadas de um *forwarder* observaram que houve diferença na densidade após a primeira passada e apresentando diferença novamente após a nona. Cerca de 80 % do incremento da compactação de um solo ocorreu após as cinco primeiras passadas de um *forwarder* (Seixas & Souza, 2007), mas o incremento da Ds não ultrapassou 7 % do valor inicial em um solo arenoso. Em condições de casa de vegetação, plantas de *E. grandis* tiveram o crescimento de raízes inibido quando a densidade do solo apresentou valores na faixa de 1,25 a 1,35 g cm⁻³ (Borges et al., 1986), valores estes próximos aos obtidos no LA de Belo Oriente. Porém, no LV de São João Evangelista os valores encontrados foram de 0,84 a 1,05 g cm⁻³. Tais dados sugerem que os efeitos danosos do tráfego pesado não se restringem apenas a compactação do solo e que solos distintos apresentarão valores “críticos” diferentes de densidade solo. Labelle & Jaeger (2011) observaram incrementos médios de 19 % na Ds após 5 anos do tráfego do *forwarder*, corroborando os dados do presente estudo em que os efeitos negativos iniciais do tráfego perduraram até o final da rotação seguinte. Tal achado é preocupante, pois a baixa capacidade do solo em recuperar do evento de compactação sugere que os efeitos negativos podem ser acumulativos ao longo das rotações, podendo comprometer a sustentabilidade da produtividade à medida que rotações mais curtas sejam praticadas.

No geral, os tratamentos sem resíduo da colheita tiveram a condutividade hidráulica reduzida para 71,5 % da condutividade hidráulica obtida nos tratamentos CC, respectivamente, evidenciando a importância da permanência da casca para atenuar o efeito da compactação do solo, uma vez que o tratamento com resíduo sem casca também apresentou baixa condutividade hidráulica. Os menores valores de Ds na linha de tráfego foram observados para os tratamentos com resíduo (contraste 1) na situação mais drástica (8 passadas) e na camada mais sensível à compactação (10-20 cm). De modo geral, os maiores valores de porosidade total nessa mesma camada tanto para 2 quanto 8 passadas evidenciam que a permanência da casca no ato da colheita do eucalipto reduz o efeito da compactação do solo, fato comprovado pelas maiores produtividades obtidas nesta situação em ambas regiões avaliadas. A baixa densidade dos resíduos orgânicos, associada com sua susceptibilidade à deformação e elasticidade, torna-os potencialmente capazes de atenuar as cargas aplicadas sobre o solo (Braidá et al., 2006). Assim, o resíduo de colheita que permanece na área pode reduzir o efeito da compactação do solo. Essa possibilidade foi confirmada por Dao (1996), ao observar que a remoção dos resíduos vegetais da superfície do solo

resultou em aumentos na densidade do solo, especialmente na camada entre 0,05 e 0,125 m de profundidade, no sistema de cultivo convencional, e entre 0 e 0,05 m, no plantio direto. O autor concluiu, ainda, que a manutenção de grandes quantidades de resíduos vegetais na superfície do solo contribuiu para maior macroporosidade na camada superficial em solos sob cultivos conservacionistas. Contrariamente, Gupta et al. (1987) não observaram diferenças significativas na densidade do solo, quando submetido a tráfego, tendo diferentes quantidades de resíduos de milho na superfície, mas com maior quantidade de resíduo na superfície houve redução da pressão atuante no solo e redução do afundamento superficial, confirmando a hipótese de que os resíduos superficiais podem atenuar cargas aplicadas sobre o solo. No presente estudo, na condição de 8 passadas a manutenção do resíduo com casca não foi suficiente para prevenir perdas na qualidade física do solo. Portanto, pode ter havido restrição a penetração das raízes de eucalipto, uma vez que valores de resistência a penetração acima de 3,0 MPa foram observados. Esse valor tem sido considerado com o limite superior para o crescimento do sistema radicular de eucalipto (Greacen & Sands, 1980 *apud* Seixas & Souza, 2007).

De acordo com o efeito negativo da compactação do presente trabalho, fica claro a importância de um monitoramento das características físicas do solo, tais como a Ds, RP e a PT, variáveis promissoras.

CONCLUSÕES

A perda de produtividade dos plantios pela compactação do solo proveniente das passadas do *forwarder* é atenuado com a permanência dos resíduos da colheita, especialmente com a manutenção da casca na área.

A remoção de resíduo, particularmente quando há remoção da casca, leva a redução do C orgânico total e de frações mais lábeis de C e N do solo.

O tráfego do *forwarder* na colheita do eucalipto da rotação anterior sobre solo sem resíduos promove perdas na qualidade física do solo, com aumento da densidade e resistência a penetração, e redução na porosidade e condutividade hidráulica. Esses efeitos negativos perduram até o final da rotação seguinte, apontando que seu efeito será cumulativo ao longo das rotações.

AGRADECIMENTOS

À Celulose Nipo-Brasileira (CENIBRA), pela disponibilidade das áreas para o experimento e apoio na coleta dos dados.

À FAPEMIG e ao CNPq, pelo contínuo suporte financeiro às pesquisas em nossos laboratórios.

LITERATURA CITADA

ALAKUKKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.36, p.141-152, 1994.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim Informativo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 25, p.27-34, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2011: ano base 2010. Brasília, 2011. 120 p.

ASSOCIATIONS OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS – AOAC. Official methods of analysis of the Associations of Official Analytical Chemists. 12.ed. Washington, D.C., 1975. 1024 p.

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B. & LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Aust. J. Agric. Res.*, v.46, p.1459-1466, 1995.

BORGES, E. N. Resposta da soja e do eucalipto à camadas compactadas de solo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1986. 54 p.

BRAIDA, J.A., REICHERT, J.M., VEIGA, M & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:605-614, 2006.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.2, p.477-485, 2008.

BRAGA, J.L.; & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. *Revista Ceres*, 21:73-85, 1974.

BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen – Total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. *Methods of soil analysis*, 2.ed. Part 2.

- Madison, American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, p.595-624, 1982.
- CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v.65, n.2, p.221-230, 2002.
- CAVICHIOLO, S.B.V.; DEDECEK, R.A. & GAVA, J.L. Modificações nos atributos físicos de solos submetidos a dois sistemas de preparo em rebrota de *Eucalyptus saligna*. *Revista Árvore*, v.29, n.4, p.571-577, 2005.
- DEDECEK, R.A. & GAVA, J.L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. *Revista Árvore*, v.29, n.3, p.383-390, 2005.
- DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Metodologia. Viçosa, UFV. Imprensa Universitária. 1997. 26p. (Boletim de Extensão 29).
- DEMOLINARI, M.S.M. Transferência do carbono de resíduos da colheita de eucalipto para as frações da matéria orgânica do solo. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2008. (Dissertação de Mestrado)
- DIAS JÚNIOR, M. S. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo situado em áreas experimentais da Cenibra: relatório do projeto de pesquisa. Lavras: UFLA, 1999. 23 p.
- DAO, T.H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a paleustoll. *Agron. J.*, 88:141-148, 1996.
- EMBRAPA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- EMBRAPA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2006. 306p.
- FENNER, P. T. Compactação do solo. In: MACHADO, C. C. Colheita florestal. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. p.375-396.
- FERNANDES, H.C.; ORLANDO, R.C.; LANÇAS, K.P. Compactação do solo em relação à exploração florestal: influência do “forwarder” e do “harvester”. *Engenharia na Agricultura*, v.5, n.4, p. 276-280, 1997.
- FERNANDES, H.C. & SOUZA, A.P. Compactação de um Latossolo Vermelho causada pelo tráfego do forwarder. *R. Árvore*, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.279-284, 2003.
- FERREIRA, P.A. Drenagem de terras agrícolas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 187p.

- GUPTA, S.C.; SCHNEIDER, E.C.; LARSON, W.E. & HADAS, A. Influence of corn residue on compression and compaction behavior of soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 51:207-212, 1987.
- LABELLE E. R., JAEGER, D. Soil Compaction Caused by Cut-to-Length Forest Operations and Possible Short-Term Natural Rehabilitation of Soil Density. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.75, p. 2314–2329, 2011.
- LIMA, J.S.S.; SOUZA, A.P.; MACHADO, C.C.; OLIVEIRA, P.C.; MARTINS FILHO, S. Estudo do comportamento da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego na colheita de madeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE DE MADEIRA FLORESTAL, 5, 2001, Porto Seguro. Anais... Viçosa: SIF, 2001. p.281-289.
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.S.; SMYTH, T.J.; MOREIRA, M.S. & LEITE, F.P. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in Southeastern Brazil. *For. Ecol. Manag.*, v. 235, p. 219-231, 2006.
- LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; VIEIRA, L.B.; MACHADO, C.C. & RINALDI, P.C.N. Compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira. *Revista Árvore*, v.30, n.3, p.369-376, 2006.
- LOPES, E.S.; SAMPIETRO, J.A.; PEREIRA, A.L.N. & OLIVEIRA, D. Compactação de um latossolo submetido ao tráfego de skidder com diferentes rodados. *Floresta*, v. 41, n. 3, p. 471-480, 2011.
- MARCHÃO, R.L.; BALBINO, L.C.; SILVA, E.M.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; AS, M.A.C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, n.6, p.873-882, 2007.
- NEVES, J.C.L. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2000. 191p. (Tese de Doutorado)
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. & REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 49 - 134.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, n.2, p.242-254, 2009.

- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *R. Bras. Ci. Solo*, 29:297-300, 2005.
- SAHRAWAT, K.L. Nitrification in some tropical soils. *Plant Soil*, v.65, p.281-286, 1982.
- SEIXAS, F. Compactação do solo devido à colheita de madeira. 75 p. Tese (Livredocência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- SEIXAS, F. & SOUZA, C.R. Avaliação e efeito da compactação do solo, devido à frequência de tráfego, na produção de madeira de eucalipto. *Revista Árvore*, v.31, n.6, p.1047-1052, 2007.
- SHANG, C. & TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical Oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. *Soil Sci.*, v.162, p. 795-807, 1997.
- SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M.S. & LEITE, F.P. Propriedades físicas e mecânicas de latossolos em diferentes manejos florestais. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 34, n.6, p. 1483-1491, 2010.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F. & VILAS BOAS, J.E.B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de latossolos com diferentes umidades. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p.759-768, 2006.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; MENDONÇA, E.S. & LEITE, F.P. Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um forwarder nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.371-377, 2007.
- SILVA, S.R.; SILVA, I.R.; BARROS, N.F. & MENDONÇA, E.S. Effect of compaction on microbial activity and carbon and nitrogen transformations in two Oxisols with different mineralogy. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.1141-1149, 2011.
- SOUZA, I.F. Decomposição de resíduos da colheita e transferência de carbono para o solo em plantações de eucalipto. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, - MG, 2012. 70 p. (Dissertação de Mestrado)
- STATSOFT, INC. (2007). STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com.
- STOLF, R.; FERNANDES, J. & FURLANI NETO, V. L. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR/STOLF. *STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v.3, p.18-23, 1983.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 19, n. 3, p. 1467-1476, 1988.

Quadro 1. Características mineralógicas de um Latossolo Vermelho (LV), localizado em São João Evangelista - MG e um Latossolo Amarelo (LA) localizado em Belo Oriente - MG

Solos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ki	Kr	Classe mineralógica ¹
	-----g kg ⁻¹ -----					
LV	123	245	80	0,85	0,71	Oxídico-caulínítico
LA	245	252	77	1,65	1,38	Caulínítico

Ki : relação molecular SiO₂/ Al₂O₃; Kr : relação molecular SiO₂/ (Al₂O₃ + Fe₂O₃).¹Embrapa (1997, 2006).

Quadro 2. Características químicas do solo após zero, duas ou oito passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG aos 5,61 anos de idade do plantio

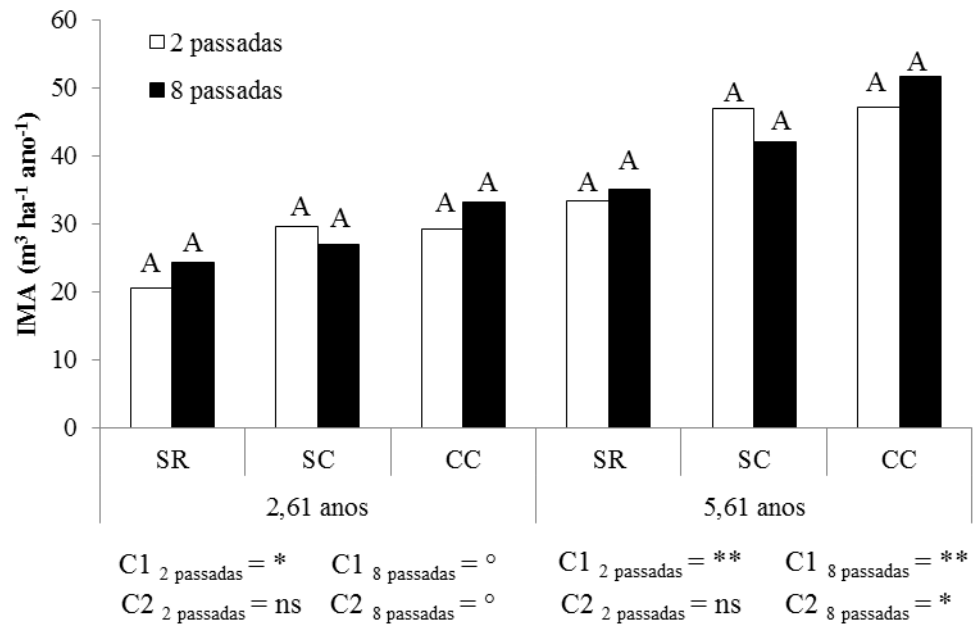
Passadas	Resíduo	pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	SB	t	Zn	Cu	Fe	Mn	Prem
		(H ₂ O)	---mg dm ⁻³ ---	---mg dm ⁻³ ---	---mg dm ⁻³ ---	---mg dm ⁻³ ---	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----mg dm ⁻³ -----	-----mg dm ⁻³ -----	-----mg dm ⁻³ -----	-----mg dm ⁻³ -----
0-20 cm															
0	SR	4,42	3,70	26,54	2,87	0,37	0,10	1,65	0,55	2,21	0,26	0,28	103,02	3,08	20,23
0	SC	4,38	2,57	29,81	2,95	0,26	0,10	1,70	0,46	2,16	1,52	1,12	158,92	2,93	20,85
0	CC	4,65	1,81	29,12	3,58	0,95	0,19	1,34	1,24	2,58	0,73	0,41	144,36	4,70	21,58
2	SR	4,37	2,69	28,50	3,29	0,16	0,08	1,79	0,33	2,13	0,72	0,52	92,86	2,43	20,57
2	SC	4,49	2,15	30,50	4,00	0,56	0,16	1,39	0,81	2,20	0,35	0,28	133,69	4,66	21,54
2	CC	4,37	1,27	33,25	3,06	0,41	0,11	1,83	0,62	2,44	0,57	0,22	86,89	3,01	19,10
8	SR	4,43	2,16	28,13	3,18	0,26	0,10	1,59	0,44	2,04	0,53	0,38	85,25	3,77	18,47
8	SC	4,43	3,33	33,37	3,67	0,37	0,12	1,61	0,60	2,21	0,78	0,45	266,31	4,48	19,18
8	CC	4,44	4,18	37,29	3,18	0,70	0,14	1,35	0,95	2,30	1,20	0,61	179,74	6,08	21,87
Média (0-20 cm)		4,44	2,65	30,72	3,31	0,45	0,12	1,58	0,67	2,25	0,74	0,48	139,00	3,90	20,38

Quadro 3. Características químicas do solo após zero, duas ou oito passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Amarelo em Belo Oriente – MG aos 5,88 anos de idade do plantio

Passadas	Resíduo	pH (H ₂ O)	P ---mg dm ⁻³	K ---	Na ---	Ca -----cmolc dm ⁻³	Mg -----	Al -----	SB -----	t	Zn -----mg dm ⁻³	Cu -----	Fe -----	Mn -----	Prem -----
0-20 cm															
0	SR	4,47	1,06	22,75	2,82	0,03	0,04	2,00	0,14	2,15	0,76	0,27	57,43	1,62	6,53
0	SC	4,50	1,30	26,88	3,29	0,04	0,04	2,09	0,17	2,26	0,51	0,27	57,62	1,76	6,78
0	CC	4,62	4,24	25,00	3,17	0,14	0,07	1,81	0,28	2,09	0,70	0,17	52,19	1,95	6,50
2	SR	4,68	0,53	21,50	3,06	0,03	0,04	1,56	0,13	1,70	0,81	0,36	46,32	1,33	7,74
2	SC	4,51	1,52	25,25	3,29	0,03	0,05	2,04	0,16	2,20	0,64	0,27	54,74	1,63	7,00
2	CC	4,64	1,13	25,25	3,76	0,05	0,05	1,89	0,18	2,08	0,65	0,23	54,36	1,97	6,59
8	SR	4,53	0,99	23,75	2,59	0,02	0,04	2,10	0,14	2,23	0,85	0,42	54,48	1,66	5,57
8	SC	4,54	2,75	30,50	4,00	0,05	0,06	2,34	0,20	2,54	0,73	0,21	117,94	1,77	4,88
8	CC	4,54	1,60	24,75	2,82	0,06	0,07	2,08	0,21	2,29	0,47	0,16	50,98	2,80	5,97
Média (0-20 cm)		4,56	1,68	25,07	3,20	0,05	0,05	1,99	0,18	2,17	0,68	0,26	60,67	1,83	6,40

São João Evangelista - LV

(a)



Belo Oriente - LA

(b)

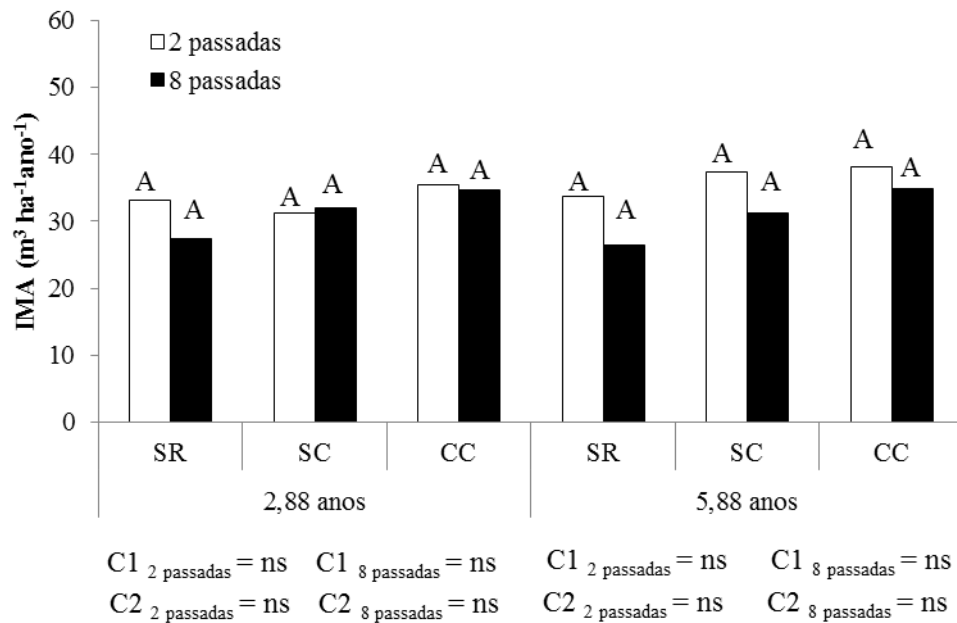


Figura 1. Incremento médio anual (IMA, m³ ha⁻¹ ano⁻¹) em duas idades após duas ou oito passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG (a) e de um Latossolo Amarelo na região de Belo Oriente – MG (b). C1: Sem resíduo (SR) vs. com resíduo (SC e CC); C2: resíduo sem casca (SC) vs. resíduo com casca (CC). **, *, °, ns: significativo a 1, 5, 10 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Médias com a mesma letra maiúscula não diferem entre si quanto ao número de passadas do *forwarder* sobre a mesma disposição de resíduo e idade, pelo teste F (p<0,10).

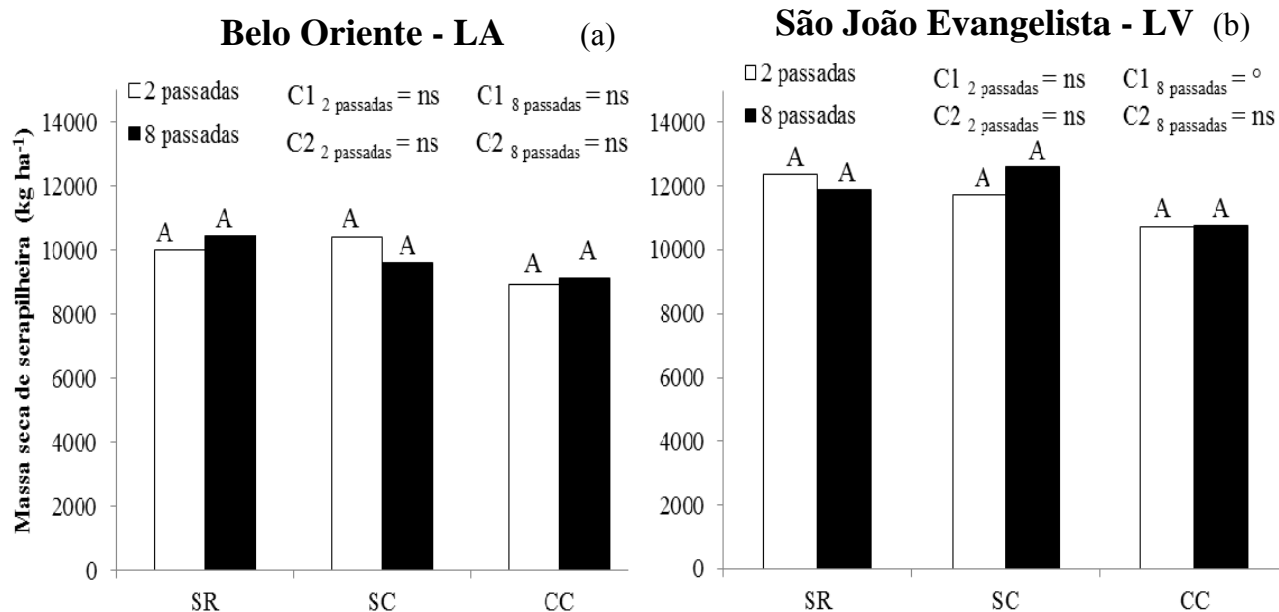


Figura 2. Massa seca de serapilheira (kg ha⁻¹) após duas ou oito passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Amarelo na região de Belo Oriente – MG (a) aos 5,88 anos de idade do plantio e de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG aos 5,61 anos de idade do plantio (b). C1: Sem resíduo (SR) vs. com resíduo (SC e CC); C2: resíduo sem casca (SC) vs. resíduo com casca (CC). °, ns: significativo a 10 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Médias com a mesma letra maiúscula não diferem entre si quanto ao número de passadas do *forwarder* sobre a mesma disposição de resíduo e idade, pelo teste F (p<0,10).

Quadro 4. Propriedades físicas do solo após 0, 2 ou 8 passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG aos 5,61 anos de idade do plantio

Res	K0				Microporosidade				Porosidade				Macroporosidade				Ds				Dp															
	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4												
0 - 10 cm																																				
SR	-	45,3	52,0	35,0	ns	ns	-	0,35	0,38	0,43	*	°	-	0,71	0,65	0,66	**	ns	-	0,36	0,27	0,23	**	ns	-	0,90	1,05	0,99	**	ns	-	3,14	3,03	2,99	ns	ns
SC	-	50,1	36,3	26,1	ns	ns	-	0,37	0,42	0,44	*	ns	-	0,68	0,69	0,69	ns	ns	-	0,31	0,27	0,25	*	ns	-	0,89	0,90	0,88	ns	ns	-	2,85	2,88	2,81	ns	ns
CC	-	66,9	65,2	32,6	ns	°	-	0,37	0,39	0,43	*	*	-	0,70	0,69	0,64	ns	*	-	0,33	0,30	0,21	*	*	-	0,87	0,90	0,93	ns	ns	-	2,89	2,97	2,23	ns	**
- C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	°	ns	-	-	C1	ns	*	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	***	*	-	-	C1	ns	ns	*	-	-	
- C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	*	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	*	-	-	
10 - 20 cm																																				
SR	77,5	37,5	37,3	*	ns	-	0,38	0,40	0,44	*	*	-	0,69	0,64	0,62	**	ns	-	0,32	0,24	0,19	**	ns	-	0,92	1,01	1,02	*	ns	-	3,00	2,81	2,72	ns	ns	
SC	84,6	43,6	49,0	*	ns	-	0,37	0,42	0,43	**	ns	-	0,70	0,65	0,65	*	ns	-	0,32	0,23	0,22	**	ns	-	0,87	0,96	0,96	*	ns	-	2,92	2,78	2,77	ns	ns	
CC	108,1	85,9	60,4	*	ns	-	0,37	0,39	0,45	*	°	-	0,70	0,70	0,71	ns	ns	-	0,33	0,31	0,26	°	°	-	0,86	0,92	0,88	ns	ns	-	2,94	3,06	3,00	ns	ns	
- C1	ns	°	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	°	**	-	-	C1	ns	ns	*	-	-	C1	°	*	**	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	
- C2	ns	°	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	*	*	-	-	C2	ns	*	ns	-	-	C2	ns	ns	*	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	

***, **, *, °, ns: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. C1: Sem resíduo (SR) vs. com resíduo (SC e CC); C2: resíduo sem casca (SC) vs. resíduo com casca (CC). C3: 0 passadas vs. com passadas (2 e 8). C4: 2 passadas vs. 8 passadas.

Quadro 5. Propriedades físicas do solo após 0, 2 ou 8 passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Amarelo em Belo Oriente – MG aos 5,88 anos de idade do plantio

Res	K0				Microporosidade				Porosidade				Macroporosidade				Ds				Dp																
	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4													
0 - 10 cm																																					
SR	-	67,9	19,2	3,9	**	ns	-	0,31	0,34	0,37	*	ns	-	0,55	0,53	0,48	*	°	-	0,24	0,19	0,11	*	*	-	1,15	1,19	1,35	°	*	-	2,56	2,53	2,59	ns	ns	
SC	-	61,5	12,7	7,3	**	ns	-	0,32	0,36	0,38	**	ns	-	0,56	0,52	0,49	*	ns	-	0,24	0,16	0,11	**	ns	-	1,13	1,23	1,31	*	ns	-	2,54	2,57	2,59	ns	ns	
CC	-	49,3	28,3	15,9	°	ns	-	0,34	0,35	0,38	°	°	-	0,55	0,54	0,49	°	°	-	0,22	0,19	0,12	°	°	-	1,16	1,19	1,31	ns	°	-	2,60	2,56	2,62	ns	ns	
- C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	-	-
- C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	-	-
10 - 20 cm																																					
SR		90,7	27,6	10,5	***	ns	-	0,29	0,35	0,36	**	ns	-	0,61	0,55	0,49	**	*	-	0,32	0,20	0,13	**	°	-	1,02	1,19	1,31	**	°	-	2,61	2,66	2,55	ns	ns	
SC		80,4	9,9	10,8	**	ns	-	0,31	0,34	0,37	*	ns	-	0,59	0,55	0,54	*	ns	-	0,28	0,21	0,18	*	ns	-	1,07	1,14	1,28	*	°	-	2,62	2,53	2,80	ns	*	
CC		69,5	21,4	14,3	**	ns	-	0,31	0,33	0,37	*	*	-	0,57	0,58	0,53	ns	*	-	0,27	0,26	0,16	°	*	-	1,08	1,13	1,31	*	*	-	2,51	2,73	2,79	*	ns	
- C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	*	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	*	-	-	-	-
- C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	*	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	-	-

***, **, *, °, ns: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. C1: Sem resíduo (SR) vs. com resíduo (SC e CC); C2: resíduo sem casca (SC) vs. resíduo com casca (CC). C3: 0 passadas vs. com passadas (2 e 8). C4: 2 passadas vs. 8 passadas.

Quadro 6. Teores de C e N orgânico do solo após 0, 2 ou 8 passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG aos 5,61 anos de idade do plantio

Res	COT (g/kg)				CL (g/kg)				CL/COT (%)				NT (g/kg)				NL (g/kg)				NT/NL (%)															
	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4												
SR	-	45,7	40,6	48,7	ns	*	-	2,73	1,90	3,28	ns	***	-	6,0	4,7	6,7	ns	*	-	2,58	2,66	2,81	ns	ns	-	0,53	0,31	0,39	ns	ns	-	20,5	11,8	13,8	ns	ns
SC	-	47,8	42,5	52,8	ns	**	-	3,02	3,12	4,19	*	**	-	6,3	7,4	7,9	*	ns	-	2,88	2,57	3,39	ns	**	-	0,51	0,62	0,42	ns	ns	-	17,6	24,0	12,4	ns	ns
CC	-	45,3	45,4	48,1	ns	ns	-	3,03	3,08	3,60	ns	ns	-	6,7	6,8	7,5	ns	ns	-	2,81	2,97	2,94	ns	ns	-	0,58	0,33	0,30	ns	ns	-	20,7	11,2	10,2	ns	ns
- C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	***	*	-	-	C1	ns	**	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	
- C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	0	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	0	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	
SR	37,9	37,2	37,8	ns	ns	-	2,19	1,98	2,21	ns	ns	-	5,8	5,3	5,8	ns	ns	-	2,34	2,22	2,47	ns	ns	-	0,44	0,40	0,43	ns	ns	-	18,7	18,1	17,4	ns	ns	
SC	43,0	40,1	46,5	ns	0	-	2,49	2,36	2,95	ns	0	-	5,8	5,9	6,3	ns	ns	-	2,64	2,29	2,62	ns	ns	-	0,37	0,39	0,29	ns	ns	-	14,1	17,1	10,9	ns	ns	
CC	40,8	41,7	44,0	ns	ns	-	2,27	2,72	2,78	0	ns	-	5,6	6,5	6,3	ns	ns	-	2,66	2,46	2,63	ns	ns	-	0,56	0,41	0,41	ns	ns	-	20,9	16,7	15,5	ns	ns	
- C1	ns	ns	*	-	-	C1	ns	0	*	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	
- C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	

***, **, *, °, ns: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. C1: Sem resíduo (SR) vs. com resíduo (SC e CC); C2: resíduo sem casca (SC) vs. resíduo com casca (CC). C3: 0 passadas vs. com passadas (2 e 8). C4: 2 passadas vs. 8 passadas.

Quadro 7. Teores de C e N orgânico do solo após 0, 2 ou 8 passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Amarelo em Belo Oriente – MG aos 5,88 anos de idade do plantio

Res	COT (g/kg)				CL (g/kg)				CL/COT (%)				NT (g/kg)				NL (g/kg)				NT/NL (%)									
	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4	0 pass.	2 pass.	8 pass.	C3 C4						
SR	-	22,0	21,6	19,5	ns ns	-	2,62	2,35	2,36	ns ns	-	11,9	10,9	12,1	ns ns	-	1,39	1,57	1,31	ns ns	-	0,35	0,24	0,48	ns ns	-	24,9	15,2	36,5	ns ⁰
SC	-	19,9	18,2	23,2	ns ⁰	-	2,53	2,48	2,63	ns ns	-	12,7	13,6	11,3	ns ns	-	1,39	1,60	1,55	ns *	-	0,32	0,22	0,32	ns ns	-	22,9	13,6	20,9	ns ns
CC	-	21,8	21,2	26,5	ns ⁰	-	2,54	2,53	3,24	ns ns	-	11,6	11,9	12,2	ns ns	-	1,50	1,75	1,60	ns ns	-	0,46	0,56	0,38	ns ns	-	30,5	32,2	24,0	ns ns
- C1	ns	ns	*	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	**	-	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-
- C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	0	ns	-	-	-	C2	ns	0	ns	-	-
SR	-	20,3	17,9	21,0	ns ns	-	2,95	2,44	2,38	ns ns	-	14,6	13,6	11,3	ns ns	-	1,39	1,39	1,36	ns **	-	0,30	0,49	0,66	⁰ ns	-	21,7	35,2	48,2	⁰ ns
SC	-	19,6	17,0	22,5	ns *	-	2,48	2,06	2,80	ns ns	-	12,6	12,2	12,4	ns ns	-	1,34	1,34	1,56	* ns	-	0,35	0,32	0,53	ns ns	-	25,9	24,0	33,7	ns ns
CC	-	19,9	18,2	22,7	ns ⁰	-	2,65	2,14	3,65	ns *	-	13,3	11,8	16,1	ns ns	-	1,45	1,51	1,52	* ⁰	-	0,41	0,53	0,40	ns ns	-	28,1	35,2	26,5	ns ns
- C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	*	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-	C1	ns	ns	*	-	-	-	C1	ns	ns	ns	-	-
- C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	ns	0	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-	C2	ns	0	ns	-	-	-	C2	ns	ns	ns	-	-

**, *, ⁰, ns: significativo a 1, 5, 10 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. C1: Sem resíduo (SR) vs. com resíduo (SC e CC); C2: resíduo sem casca (SC) vs. resíduo com casca (CC). C3: 0 passadas vs. com passadas (2 e 8). C4: 2 passadas vs. 8 passadas.

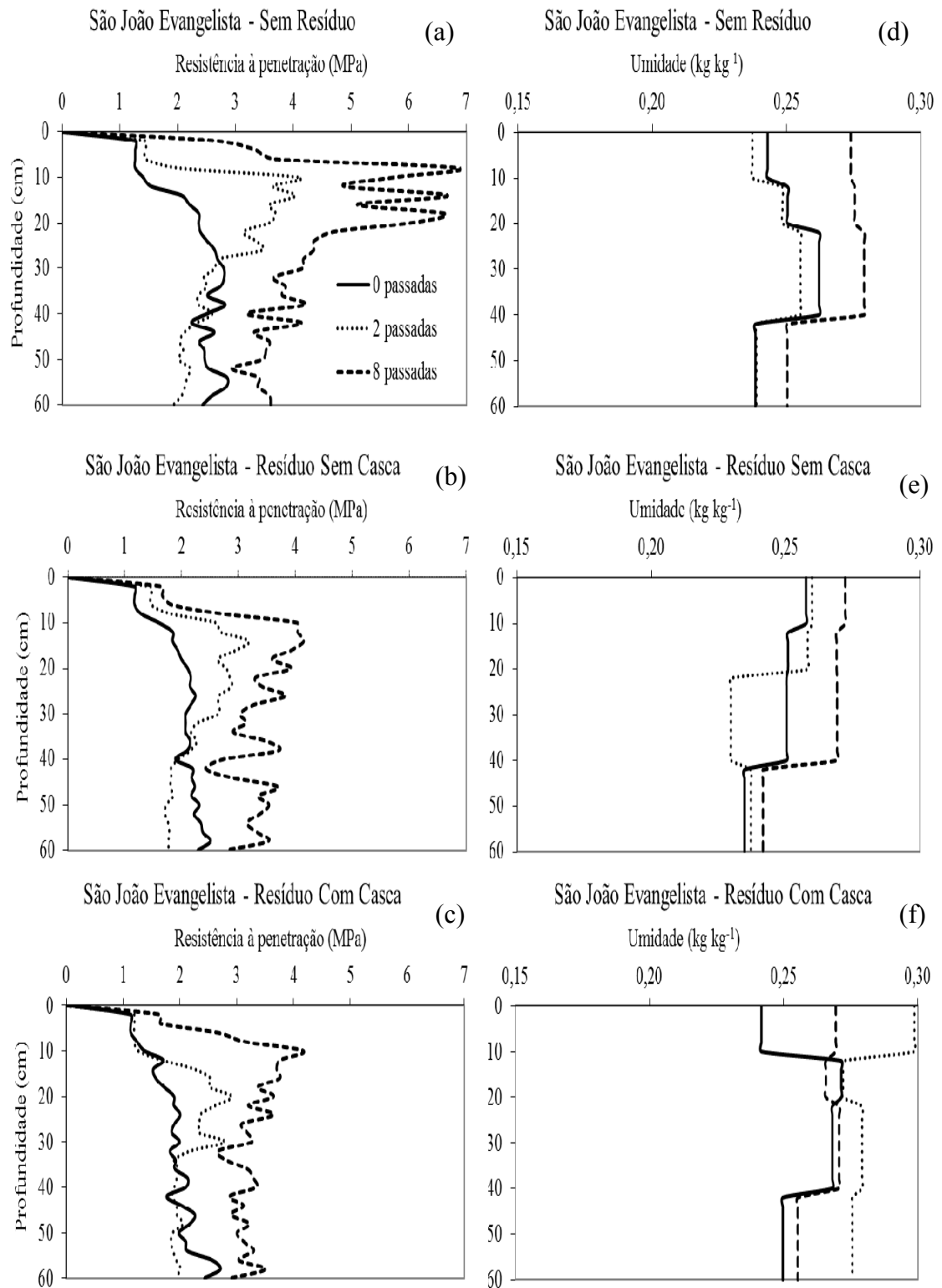


Figura 3. Resistência à penetração (a, b, c) e umidade do solo (d, e, f) de acordo com o número de passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG aos 5,61 anos de idade do plantio.

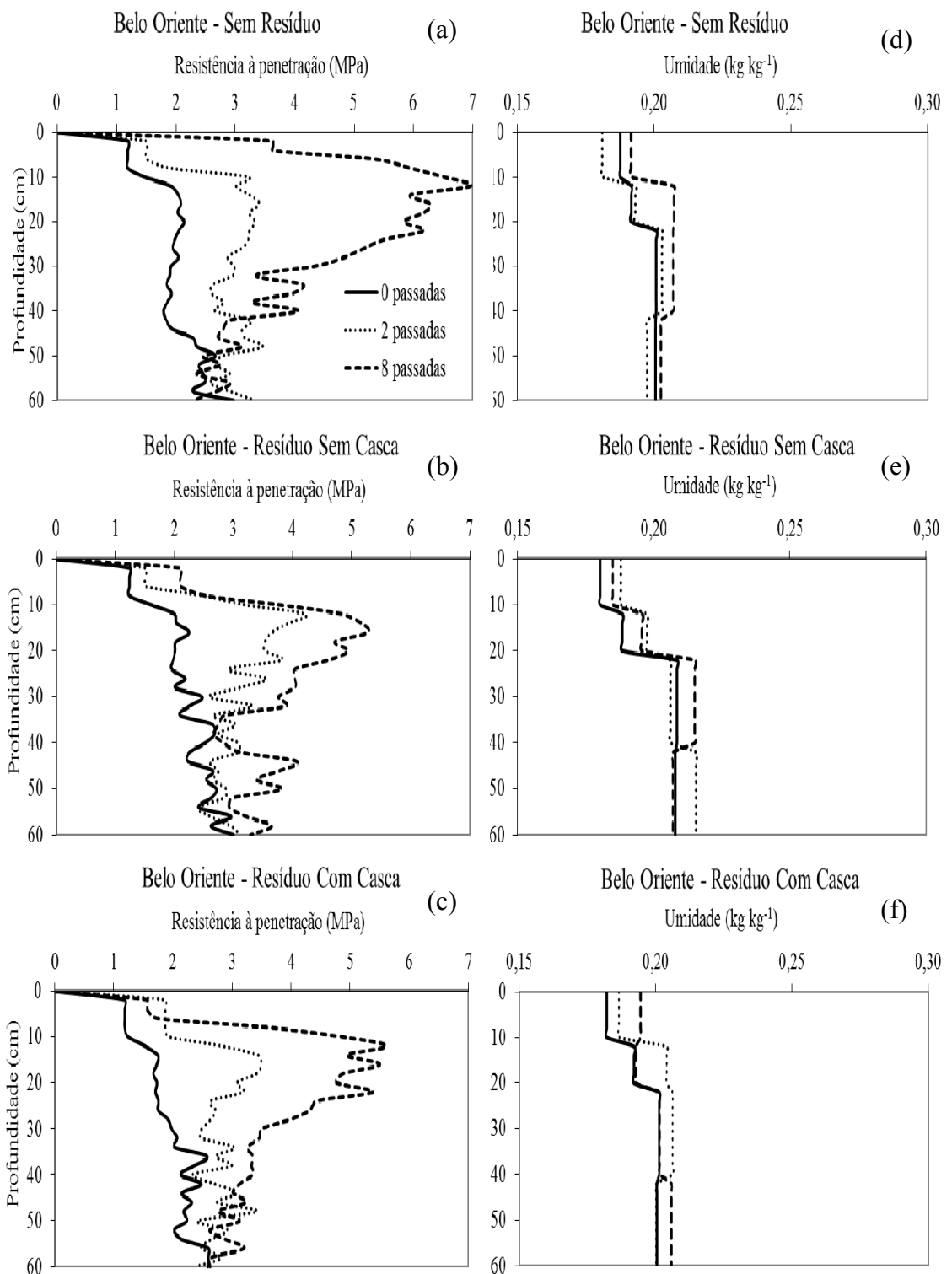


Figura 4. Resistência à penetração (a, b, c) e umidade do solo (d, e, f) de acordo com o número de passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Amarelo em Belo Oriente – MG aos 5,88 anos de idade do plantio.

ANEXOS

Anexo 1. Análise de variância das propriedades físicas do solo e das frações da matéria orgânica após zero, duas ou oito passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm) de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG aos 5,61 anos de idade do plantio

F.V.	G.L.	Quadrado Médio										
		K0	Microp	Porosidade	Macrop	Ds	COT	CL	CL/COT	NT	NL	NL/NT
Bloco	1	116,2	0,009203***	0,00206*	0,002624°	0,05456***	1411,85***	5,7389***	0	4,3782***	1,632933***	4008,92***
Passadas	2	3103,3**	0,013252***	0,00417**	0,03118***	0,01648***	77,84*	1,437***	0,000227*	0,2357*	0,049604	115,39
Passadas*Bloco (Res. A)	2	705,2	0,001634*	0,0003	0,003227*	0,0023	2,84	0,0596	0,000038	0,0287	0,062011	103,44
Tipo de Resíduo	2	1942,3**	0,000499	0,00252*	0,002134°	0,02866***	54,32*	1,4007***	0,000302*	0,2028°	0,000918	5,81
Passadas*Resíduo	4	215,1	0,000349	0,00085	0,0015	0,00175	11,07	0,2125	0,000067	0,074	0,023321	42,2
Prof	1	3383,5**	0,000293	0,00026	0,001154	0,00102	253,65***	4,0042***	0,000448*	1,2001***	0,010024	24,69
Passadas*Prof	2	746,8	0,000013	0,00016	0,000139	0,00041	12,26	0,372*	0,000079	0,0572	0,006472	15,1
Tipo de resíduo*Prof	2	415,4	0,000333	0,0023*	0,002725*	0,00226	9,62	0,0815	0,000074	0,0094	0,040205	58,74
Passadas*Tipo resíduo*Prof	4	52,4	0,000141	0,00105°	0,000502	0,00251	3,22	0,0798	0,000034	0,0353	0,005073	13,02
Resíduo B	15	282,4	0,000305	0,00043	0,00074	0,00133	12,45	0,0943	0,00006	0,0601	0,032557	61,74

°, *, **, ***: significativo a 10, 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Anexo 2. Análise de variância das propriedades físicas do solo e das frações da matéria orgânica após zero, duas ou oito passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm) de um Latossolo Amarelo em Belo Oriente – MG aos 5,88 anos de idade do plantio

F.V.	G.L.	Quadrado Médio										
		K0	Microp	Porosidade	Macrop	Ds	COT	CL	CL/COT	NT	NL	NL/NT
Bloco	1	1297,29*	0,000119	0,00001	0,000175	0,01376°	172,29***	7,4187***	43,463*	0,0094	0,0141	57,09
Passadas	2	12235,09***	0,01067***	0,01367***	0,048186***	0,13583***	37,94*	0,7792*	1,365	0,04305*	0,030356	145,37
Passadas*Bloco (Res. A)	2	1205,66*	0,000915°	0,0021*	0,005604*	0,01975*	2,57	1,6997**	46,621**	0,00233	0,068771	374,5°
Tipo de Resíduo	2	115,83	0,000366	0,00044	0,00005	0,00032	9,35	0,3244	1,056	0,07273**	0,041527	158,67
Passadas*Resíduo	4	286,49	0,000192	0,00108°	0,001864	0,00169	9,11	0,4867°	2,859	0,02072°	0,043431	228,66
Prof	1	530,48	0,001703*	0,00979***	0,01966***	0,02829*	24,45°	0,0095	7,081	0,06928**	0,048029	370,33
Passadas*Prof	2	384,88	0,000057	0,00005	0,000217	0,00332	2,28	0,1604	1,435	0,04259*	0,020954	117,56
Tipo de resíduo*Prof	2	59,71	0,000139	0,00003	0,000217	0,00009	3,82	0,0466	5,424	0,00494	0,020023	62,48
Passadas*Tipo resíduo*Prof	4	12,23	0,000191	0,00048	0,000862	0,00178	2,93	0,0554	3,589	0,00095	0,005693	23,85
Resíduo B	15	228,77	0,000269	0,00045	0,001002	0,00341	6,62	0,2036	7,155	0,00689	0,028705	122,72

°, *, **, ***: significativo a 10, 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Anexo 3. Análise de variância de massa seca de serapilheira após duas ou oito passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Amarelo em Belo Oriente – MG aos 5,88 anos e de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG aos 5,61 anos de idade do plantio

F.V.	G.L.	Quadrado Médio M.S. Serap.
Bloco (BO e SJE)	3	13212100***
Passadas	1	12580,95
Bloco*Passadas	3	1212601
Resíduo	2	4066650*
Passadas*Resíduo	2	11823,16
Resíduo (Erro)	12	932403,2

*, ***: significativo a 5 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Anexo 4. Análise de variância das características dendrométricas após duas ou oito passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG em duas idades distintas

F.V.	G.L.	Quadrado Médio				Incremento médio anual (IMA)
		<i>dap</i>	Altura	Volume individual	Volume por ha	
Bloco	1	8,1899***	17,649***	0,01004***	10701,6869***	557,7131***
Passadas	1	0,086	1,3092°	0,000	0,676	0,798
Passadas*Bloco (Resíduo A)	1	2,6677*	2,3046*	0,0022*	985,74359°	39,1828°
Resíduo	2	16,1821***	4,1256**	0,0121***	13000,7879***	572,3359***
Passadas*Resíduo	2	0,743	4,4508***	0,001	1254,8904*	59,5798*
Passadas*Resíduo*Bloco (Resíduo B)	2	0,358	1,4509*	0,000	376,234	13,959
Idade	2	99,722***	353,8694***	0,1122***	110686,3799***	1183,2235***
Passadas*Idade	2	0,052	0,762	0,000	81,516	5,636
Resíduo*Idade	4	0,230	0,177	0,0012°	1361,6558*	18,789
Passadas*Resíduo*Idade	4	0,085	0,352	0,000	101,851	0,938
Resíduo C	14	0,330	0,358	0,000	307,503	10,335

°, *, **, ***: significativo a 10, 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Anexo 5. Análise de variância dos tratamentos das características dendrométricas após duas ou oito passadas do *forwarder* sobre resíduo da colheita do eucalipto sem casca (SC); resíduo com casca (CC), ou sobre o solo sem resíduo (SR) de um Latossolo Amarelo em Belo Oriente – MG em duas idades distintas

F.V.	G.L.	Quadrado Médio				Incremento médio anual (IMA)
		<i>dap</i>	Altura	Volume individual	Volume por ha	
Bloco	1	0,365	3,670	0,000	2521,3 ^o	115,81*
Passadas	1	9,761**	0,010	0,0034*	2470,8 ^o	95,23*
Passadas*Bloco (Resíduo A)	1	2,34 ^o	7,400	0,0028 ^o	2060,5 ^o	78,5*
Resíduo	2	0,451	5,910	0,000	2009,5 ^o	88,24*
Passadas*Resíduo	2	2,603*	1,880	0,001	336,900	17,920
Passadas*Resíduo*Bloco (Resíduo B)	2	7,057**	20,53*	0,0049**	9677,7***	413,55***
Idade	2	34,679***	179,08***	0,040***	34079,4***	7,940
Passadas*Idade	2	0,178	3,400	0,001	601,500	11,810
Resíduo*Idade	4	0,040	1,420	0,000	176,200	2,380
Passadas*Resíduo*Idade	4	0,022	1,930	0,000	33,300	1,970
Resíduo C	14	0,553	4,93	0,000693	569,8	16,13

^o, *, **, ***: significativo a 10, 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

CAPÍTULO 2

PRODUTIVIDADE E FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DE LATOSSOLOS INFLUENCIADAS PELO ESPAÇAMENTO DO EUCALIPTO EM ROTAÇÃO DE 11 ANOS

RESUMO

O espaçamento ideal é aquele que proporciona a máxima produtividade de madeira aproveitável, com menor custo e melhor qualidade dos fatoes de produção. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes espaçamentos e arranjos de plantio na produtividade e na MOS de um LV e um LA, plantados com clones aos 11 anos de idade. Os tratamentos consistiram de um esquema em parcelas subdivididas, sendo 2 x 5 no LV: 2 clones (1213 e 7434); e 5 espaçamentos [$6 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ (3 x 2 m); $9 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ (3 x 3 m); $10 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ (3,6 x 2,8 m); $12 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ (4 x 3 m e 6 x 2 m)] e 2 x 6 no LA: 2 clones (1213 e 57) e 6 espaçamentos [$6 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ (3 x 2 m); $9 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ (3 x 3 m); $10 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ (4,0 x 2,5 m); $12 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ (4 x 3 m e 6 x 2 m); $15 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ (6 x 2,5 m)]. O espaçamento de $6 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ promoveu maior incremento médio anual de celulose (IMAcél). Espaçamentos maiores apresentaram menor produção de serapilheira (clone 1213), mas os teores de COT e das frações de C e N oxidáveis com permanganato de potássio (COPK e NOPK, respectivamente) não foram influenciadas pelo espaçamento. Os dados indicam que é possível manter produtividade em rotações mais longas e assim melhorar a sustentabilidade do processo de produção.

Palavras-chave: densidade de plantas, Carbono oxidável por permanganato, espaçamento

SUMMARY

The ideal spacing is the one that provides the highest wood productivity usable for production of end product with lower cost and with no wasted space. The present study evaluates the effect of different spacings and planting arrangements in productivity and a SOM of Oxisols in different clones per region at the age of 11 years. The treatments consisted of a subdivided plot scheme, with 2 x 5 in the Oxisol at São João Evangelista: two clones (1213 and 7434) and 5 spacings [$6 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ (3 x 2 m), $9 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ (3 x 3 m), $10 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ (3.6 x 2.8 m), $12 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ (4 x 3 m, 6 x 2 m)] and at Belo Oriente 2 x 6: two clones (1213 and 57), and 6 spacings [$6 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ (3 x 2 m), $9 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ (3 x 3 m), $10 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ (4.0 x 2.5 m), $12 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ (4 x 3 m, 6 x 2 m), $15 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ (6 x 2.5 m)]. The spacing of $6 \text{ m}^2 \text{ plant}^{-1}$ promoted higher cellulose average annual increment (IMAc_{cel}). Larger spacings had lower litter production. The Total Organic Carbon contents and labile fractions were not affected by spacing. It is possible to maintain the productivity in longer rotations.

Keywords: plant density, IMA_{cel}, labile carbon, planting arrangement

INTRODUÇÃO

Um dos fatores que se relaciona diretamente com a produtividade de florestas plantadas de eucalipto é o espaçamento adotado. A adoção do espaçamento adequado pode otimizar o uso da água, dos nutrientes e da radiação solar (Bernardo, 1995), mas quando não adequado pode, em alguns casos, até levar a morte de plantas devido à alta competição entre elas por recursos em determinados períodos. O espaçamento inicial deve ter um número mínimo de árvores para garantir a produtividade esperada por área ao final da rotação (Gerrand et al., 1997).

Geralmente, os espaçamentos utilizados no Brasil para materiais clonais garantem uma população de 800 a 2000 plantas ha^{-1} , que limitará o uso dos recursos por planta pela limitação de área e, obviamente, influenciará na taxa de crescimento das árvores, na taxa de crescimento do povoamento, na qualidade da madeira, na idade de corte e nas práticas de implantação, manejo, conservação do solo e colheita, além dos custos de produção e rentabilidade (Mello et al., 1976; Balloni & Simões, 1980; Berger, 2000).

Espaçamentos menores proporcionam maior crescimento por hectare (Berger et al., 2002), provavelmente devido ao rápido desenvolvimento e fechamento do dossel da floresta, de altas taxas de captura de água, luz e nutrientes. Os plantios mais adensados podem ter outras vantagens tais como a maior supressão de plantas daninhas, menor exposição do solo à erosão em curto espaço de tempo, menor necessidade de reposição de mudas e viabilização de condução da 2ª rotação em sistema de talhadia. Já espaçamentos maiores acarretam em árvores com volumes individuais maiores, que podem refletir em valor mais elevado por metro cúbico de madeira (Stape & Binkley, 2010), e podem apresentar menor custo de implantação.

Assim, o espaçamento ideal é aquele que proporcionará a máxima produtividade de madeira aproveitável para produção do produto final com um menor custo. Entretanto, a maioria dos plantios de eucalipto são manejados intensivamente, permanecem não desbastados, e, em ambientes sub-tropicais e tropicais, são colhidos em aproximadamente 6 a 7 anos (Forrester et al., 2010). Além disso, vários pesquisadores e empresas florestais têm estudado o efeito do espaçamento de plantio sobre o crescimento, produção, qualidade da madeira e utilização de recursos (Mello et al., 1972; Simões et al., 1980; Bernardo et al., 1998; Leite et al., 1999; Berger et al., 2002; Oliveira Neto et al., 2003; Silva, 2005;

Forrester et al., 2010; Stape et al., 2010; Leite et al., 2011). Porém, os trabalhos são para uma rotação de 7 anos, não se conhecendo o efeito de diferentes espaçamentos em rotações um pouco mais longas na produtividade e aporte de C ao solo. Além da produtividade, a sustentabilidade produtiva ao longo das rotações tem sido foco de preocupação.

A matéria orgânica do solo (MOS) é um importante indicador de qualidade do solo, sendo intimamente relacionada com a produtividade (Menezes, 2005). A quantidade de C orgânico no solo é resultante do balanço líquido entre a taxa de material orgânico que entra no sistema e a taxa de mineralização da matéria orgânica (Post & Kwon, 2000). Neste contexto, deve-se buscar o incremento de matéria orgânica nos solos, a qual depende do aporte de compostos orgânicos vegetais sintetizados durante a fotossíntese (Mielniczuk, 2008). Assim, a quantidade de resíduo que é depositada no solo se relaciona com o teor de C estável do solo (Larson et al., 1972; Paustian et al., 1997; Bayer et al., 2000; Six et al., 2002; Diekow et al., 2005). Além do fator quantidade, a qualidade do material depositado é importante para a conversão do mesmo em matéria orgânica estável. Materiais como folhas, ricos em carboidratos solúveis, se decompõem rapidamente, porém, em contrapartida, tem pouca contribuição para a matéria orgânica estável, ao passo que materiais mais recalcitrantes, com compostos aromáticos e fenólicos, de difícil decomposição pela microbiota do solo constituirão, em longo prazo, em matéria orgânica estável (Demolinari, 2008). Assim, é de se esperar que rotações sucessivas de florestas com idades acima de 7 anos, em espaçamentos que potencializem o aporte de resíduos, levem ao incremento de MOS comparativamente às florestas colhidas em idades mais jovens. No entanto, a matéria orgânica do solo é reconhecida por constituir de várias frações com variados graus de decomposição, recalcitrância e taxa de ciclagem (Huang et al., 2008). As frações mais lábeis da MOS são mais sensíveis às alterações de manejo comparativamente ao Carbono Orgânico Total (COT) (He et al., 2008) e podem ser usadas como indicadores precoces de alterações na MOS induzida por diferentes aportes de resíduos vegetais e manejo do solo.

O objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito de diferentes espaçamentos e arranjos de plantio na produtividade de madeira e de celulose, e na matéria orgânica de um Latossolo Vermelho oxidico de São João Evangelista, MG e um Latossolo Amarelo caulínico de Belo Oriente, MG plantados com dois clones por

região, aos 11 anos de idade, bem como avaliar o efeito dos tratamentos na partição da parte aérea das plantas, identificando o melhor espaçamento visando à produção de celulose.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área de estudo

O presente estudo foi realizado em áreas da empresa Celulose Nipo-Brasileira S.A. (Cenibra) em dois locais, no município de São João Evangelista, MG, a 18°35'25"S e 42°49'22"W, com altitude de 850 m em Latossolo Vermelho (LVd1), textura argilosa (55 % de argila); no município de Belo Oriente, MG, a 19°25'03"S e 43°27'40"W com altitude de 270 m em Latossolo Amarelo (LAd1), textura argilo-arenosa (38 % de argila).

Os ensaios foram instalados no mês de novembro e dezembro de 1999 em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente. Após 20 dias do plantio do eucalipto utilizou-se formulação NPK contendo 6 % de N, 30 % de P₂O₅ e 6 % de K₂O na dose de 150 kg ha⁻¹. Aos três meses após o plantio, foram aplicados 400 kg ha⁻¹ de fosfato natural reativo, bem como 300 kg ha⁻¹ de KCl + 1 % B em São João Evangelista e 200 kg ha⁻¹ de KCl + 2 % B em Belo Oriente, aplicados em duas faixas laterais. Neste mesmo período também foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de FTE BR 12 na projeção da copa. Aplicou-se 500 kg ha⁻¹ e 600 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente, parcelado em duas épocas (aos 12 e 24 meses de idade). Realizou-se, também, a aplicação de 1.500 kg ha⁻¹ de calcário em área total no mês de março de 2000, como fonte de Ca e Mg em São João Evangelista.

Em São João Evangelista, os tratamentos consistiram de um esquema em parcelas subdivididas, sendo 2 x 5: 2 materiais genéticos (clones 1213 e 7434) sendo a parcela; e 5 espaçamentos [6 m² planta⁻¹ (3 x 2 m); 9 m² planta⁻¹ (3 x 3 m); 10 m² planta⁻¹ (3,6 x 2,8 m); 12 m² planta⁻¹ (4 x 3 m e 6 x 2 m)] sendo a subparcela. Em Belo Oriente, os tratamentos consistiram de um esquema em parcelas subdivididas, sendo dois materiais genéticos (clones 1213 e 57) alocados às parcelas, enquanto seis espaçamentos [6 m² planta⁻¹ (3 x 2 m); 9 m² planta⁻¹ (3 x 3 m); 10 m² planta⁻¹ (4,0 x 2,5 m); 12 m² planta⁻¹ (4 x 3 m e 6 x 2 m); 15 m² planta⁻¹ (6 x 2,5 m²)] foram alocados às subparcelas.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições, sendo 900 m² a área total de cada subparcela. A última linha de cada subparcela foi desconsiderada (bordadura).

Coleta e análises de amostras de solo

Amostras de solo foram coletadas quando as árvores estavam com 11 anos e 3 meses de idade em ambas as regiões. Foram coletadas cinco amostras simples nas camadas de 0-10 e 10-20 cm para uma amostra composta por camada em cada subparcela.

As amostras foram submetidas às análises químicas após serem secas ao ar, destorroadas, passadas em peneiras de 2 mm de malha e homogeneizadas (Quadro 1). Para a dosagem de Al, Ca e Mg trocáveis utilizou-se o extrator KCl 1 mol L⁻¹; bem como para a dosagem de P, K, Fe, Mn, Zn e Cu o extrator Mehlich-1, de acordo com método descrito por Defelipo & Ribeiro (1997). Nos extratos, os teores de P foram determinados por colorimetria (Braga & Defelipo, 1974), os de K por fotometria de emissão de chama e os de Ca, Mg, Al e micronutrientes (exceto B) por espectrofotometria de absorção atômica (AOAC, 1975). O Boro foi extraído com água quente (65 °C) e quantificado por colorimetria utilizando Azometina-H.O pH em água também foi quantificado. O P remanescente foi determinado de acordo com Alvarez V. et al. (2000).

O Carbono Orgânico Total (COT) do solo foi dosado pela titulação do dicromato remanescente da oxidação da MOS (Yeomans & Bremner, 1988). Para determinação da fração do C potencialmente mais lábil da MOS utilizou-se o método proposto por Blair et al. (1995) e modificado por Shang & Tiessen (1997) que se baseia no uso de solução diluída de KMnO₄. Como essa solução nem sempre oxida seletivamente apenas o C lábil (CL) (Tirol-Padre & Ladha, 2004), doravante será usado o termo C oxidável por permanganato de potássio (COPK). O N oxidável por permanganato de potássio (NOPK) foi determinado segundo Sahrawat (1982) após destilação Kjeldahl de 10 mL do extrato obtido durante a determinação do COPK. O nitrogênio total (NT) foi determinado por meio de destilação Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982).

Medição, coleta e análise do material vegetal

Medições do diâmetro a altura de 1,3 m (*dap*) e altura total das árvores foram realizadas de dois até aos 11 anos de idade coletando-se dados individuais das árvores da parcela útil em cada uma das subparcelas e calculando-se o volume individual por meio da equação de volume.

Aos 11 anos e 3 meses mediu-se o *dap* e a altura de todas as árvores da área útil da parcela. Abateu-se uma árvore com diâmetro correspondente ao da árvore média do respectivo tratamento em cada subparcela. A altura comercial (definida por um diâmetro de tronco superior a 6 cm) e a total foram medidas, efetuando-se a cubagem da árvore abatida medindo os diâmetros a 0,1 m da base da planta e a 25, 50, 75 e 100 % da altura comercial. Cada componente da árvore (folhas, galhos, casca e lenho) foi pesado no campo para determinação da massa fresca. Discos do tronco da árvore, com lenho e casca, foram coletados nas posições correspondentes a 0,1 m da base da planta e a 25, 50, 75 e 100 % da altura comercial, e amostras de folhas e galhos coletadas para determinação da massa seca.

A densidade básica do lenho, após saturação dos cinco discos por árvore em água, foi determinada pelo método do deslocamento de água utilizando balança hidrostática. Para determinação do rendimento depurado, após a lavagem do licor preto e liquidificação da polpa, utilizou-se depurador com peneira de fenda de 0,2 mm para separar o rejeito da polpa, sendo determinada a massa úmida e, então, retirou-se uma subamostra para determinação da massa seca. Para determinação do IMAcel, em toneladas de celulose seca ao ar (tsa), utilizou-se a seguinte fórmula (CENIBRA, dados não publicados):

$$\text{IMAcel (tsa ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) = (\text{IMA s/casca}) / (900 / (\text{DB} \times \text{RD} / 100)) \times 0,94$$

Onde:

IMA: o incremento médio anual em volume do lenho em $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$;

900: percentual de consistência da celulose e conversão de m^3 em t;

DB: densidade básica do lenho em kg m^{-3} ;

RD: rendimento depurado de celulose em %;

0,94: 6 % de perda no processo de branqueamento da celulose.

Amostras de serapilheira foram coletadas em cada subparcela. Para tanto, coletaram-se quatro amostras simples, sendo duas nas linhas e duas nas entrelinhas de plantio, para compor uma amostra composta, utilizando um gabarito de 0,5 m x 0,5 m. Após determinação da massa fresca, subamostras de serapilheira foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 h e pesadas para determinação da massa seca.

Os dados referentes às características dendrométricas, produção de matéria seca vegetal e celulose, e dos teores de matéria orgânica foram submetidos à análise de variância. Posteriormente, realizou-se o desdobramento dos graus de liberdade de

tratamentos e, por meio de regressões, avaliou-se o efeito dos espaçamentos por clone nas características dendrométricas, na produção de massa seca vegetal e celulose, bem como nos teores de matéria orgânica do solo adotando-se o nível de significância de até 10 %. Utilizou-se para o processamento dos dados o programa estatístico STATISTICA versão 8.0 (StatSoft, Inc., 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produtividade florestal

A produção volumétrica individual do lenho foi maior na região de São João Evangelista ($0,567 \text{ m}^3 \text{ planta}^{-1}$), sendo o clone 7434 com maior média ($0,600 \text{ m}^3 \text{ planta}^{-1}$) em relação ao clone 1213 ($0,533 \text{ m}^3 \text{ planta}^{-1}$) (Figura 1a). Em Belo Oriente, a média do volume individual dos dois clones foi 30,9 % inferior à média apresentada em São João Evangelista, sendo o clone 57 com maiores valores de volume individual ($0,466 \text{ m}^3 \text{ planta}^{-1}$) em relação ao clone 1213 ($0,319 \text{ m}^3 \text{ planta}^{-1}$). A produção volumétrica individual foi influenciada significativamente pelo espaçamento de forma linear e positiva independentemente do clone e da região do estudo (Figura 1a). O volume individual foi, em média, 80 % maior para as menores populações de plantas por área. Em espaçamentos maiores a disponibilidade de recursos como água, nutrientes e luz é maior, refletindo em maior volume individual. Estes dados corroboram com Balloni & Simões (1980) e Berger et al. (2002), que observaram maiores *dap* para as plantas com maior espaçamento aos 11 e 10 anos, respectivamente. Para o espaçamento de $12 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ observou-se que o arranjo de $6 \times 2 \text{ m}$ apresentou maiores volumes individuais, em média 8,9 % superior, com exceção do clone 1213 na região de São João Evangelista em que o arranjo $4 \times 3 \text{ m}$ foi 7,7 % maior que o das plantas do arranjo $6 \times 2 \text{ m}$ (Figura 1).

O volume do lenho por área, em contrapartida, foi influenciado significativamente pelo espaçamento de forma linear e negativa independentemente do clone e da região do estudo (Figura 1b), sendo o volume do lenho por área (média de clones) 11,7 % e 27,3 % menor para as menores populações de plantas em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente. Apenas o clone 1213 em Belo Oriente apresentou comportamento quadrático em relação ao efeito do espaçamento, com o espaçamento de $9 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$, espaçamento este bastante utilizado no setor florestal, de menor volume de lenho. Esse comportamento não foi devido à

ocorrência de *outliers*, uma vez que o comportamento foi o mesmo em todas as repetições. Em São João Evangelista, o volume do lenho médio foi de $570 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e em Belo Oriente, o volume do lenho médio foi de $354 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Trabalhos com avaliação até aos seis anos de idade são semelhantes com estes resultados, bem como com os obtidos aos 6 anos de idade (Quadros 2 e 3), onde o incremento médio anual foi menor nos espaçamentos maiores (Stape et al., 1988; Berger et al., 2002; Silva, 2005). No entanto, se espera que em idades próximas do corte em rotações mais longas a limitação por recursos em espaçamentos menores faça com que os espaçamentos maiores tendam a equivaler em produtividade (Miller, 1995). Segundo Ladeira (1999), em plantios mais densos ocorre a estagnação de crescimento mais cedo devido à rápida ocupação do sítio e competição entre plantas, resultando em rotações mais curtas, contrastando com os resultados deste trabalho. Da mesma forma que no volume individual para o espaçamento de $12 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$, observou-se que o arranjo de $6 \times 2 \text{ m}$ apresentou maiores volumes de lenho (Figura 1b).

O percentual de casca médio foi de 15,16 % (Figura 2a), sendo de 15,2 % na região de Belo Oriente e de 15,11 % na região de São João Evangelista. Considerando que o percentual de casca esperado para espaçamentos em torno de 7,5 a $9 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ é de 13 %, houve incremento de 16,6 % deste componente para as plantas mais velhas (11 anos) no presente estudo. Porém, aos seis anos de idade, avaliando apenas o clone 1213 nos arranjos espaciais de $3 \times 2 \text{ m}$ e $4 \times 3 \text{ m}$, o percentual de casca médio foi de 14,2 %, sendo 14,5 % em São João Evangelista e 14 % em Belo Oriente, ou seja, 6,6 % de incremento deste componente para a idade em estudo em relação aos 6 anos.

A densidade básica média do lenho foi de 559 kg m^{-3} , sendo 560 kg m^{-3} em Belo Oriente e 558 kg m^{-3} em São João Evangelista (Figura 2b). Aos seis anos de idade considerando-se apenas o clone 1213 nos arranjos espaciais de $3 \times 2 \text{ m}$ e $4 \times 3 \text{ m}$, a densidade básica apresentada foi de 501 kg m^{-3} , sendo 515 kg m^{-3} em São João Evangelista e 487 kg m^{-3} em Belo Oriente. Assim, em média, houve incremento em torno de 11,5 % da densidade básica em relação à avaliação aos 6 anos, sendo este incremento proporcionalmente maior para a região de Belo Oriente. Os clones 57 e 1213 apresentaram maior densidade básica do lenho em Belo Oriente e em São João Evangelista, respectivamente. De maneira geral, a densidade básica não foi influenciada pelos espaçamentos (Figura 2b). Em relação ao arranjo no espaçamento

de 12 m² planta⁻¹, as plantas do arranjo 4 x 3 m apresentaram maiores valores de densidade básica, com exceção do clone 1213 em São João Evangelista.

O rendimento depurado médio observado para plantas de ambas regiões foi de 51,97 %, sendo 52,71 % em São João Evangelista e 51,23 % em Belo Oriente (Figura 3a). Aos 6 anos de idade, avaliando apenas o clone 1213 nos arranjos espaciais de 3 x 2 m e 4 x 3 m, o rendimento depurado foi de 53,90 %, sendo 53,28 % em São João Evangelista e 54,53 % em Belo Oriente. Houve, portanto, para as plantas avaliadas aos 11 anos de idade, redução do rendimento depurado em torno de 3,6 % em relação à avaliação aos 6 anos. O fator espaçamento não influenciou o rendimento depurado (Figura 3a).

O incremento médio anual de celulose (IMAcel), variável de maior interesse para avaliar o efeito do espaçamento para o setor de celulose, apresentou média aos 11 anos (de clones) de 15,31 tsa ha⁻¹ ano⁻¹ em São João Evangelista e de 9,41 tsa ha⁻¹ ano⁻¹ em Belo Oriente (Figura 3b), sendo que o clone 1213, comum em ambas as regiões, apresentou em Belo Oriente apenas 51% do IMAcel obtido em São João Evangelista na mesma amplitude de espaçamento. Esta diferença em produtividade pode ser explicada pelo maior déficit de pressão de vapor e menores teores de matéria orgânica do solo em Belo Oriente (Menezes, 2005), fatores esses que contribuem negativamente para a produtividade do eucalipto nessa região. Além disso, foi encontrado menor sobrevivência (média de clones) em Belo Oriente (94 %) em relação à São João Evangelista (98 %). O efeito do espaçamento no IMAcel foi linear e negativo para o clone 1213 em São João Evangelista, bem como para o clone 57 em Belo Oriente. O efeito do espaçamento para o clone 1213 em Belo Oriente foi quadrático e para o clone 7434 em São João Evangelista não houve efeito do espaçamento em relação ao IMAcel. O IMAcel, em média, foi 10,3 % e 28,1 % menor para as menores densidades de plantas em relação àquela maior em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente.

O clone 1213 na última idade avaliada apresentou valores de IMAcel no menor espaçamento de 10,7 tsa ha⁻¹ ano⁻¹ e 15,8 tsa ha⁻¹ ano⁻¹ em Belo Oriente e São João Evangelista, respectivamente (Figura 3b). Estes valores são 11,5 % superiores em comparação aos seis anos de idade em São João Evangelista, e 3,7 % inferiores aos obtidos em Belo Oriente. Estes resultados indicam que é possível obter produtividades equivalentes para eucalipto cultivado em rotações mais longas em relação àquele manejado em rotações mais curtas. Ficou evidente, também que

decisões tomadas com base em avaliações precoces podem resultar em menor produtividade em longo prazo pela escolha menos assertiva de espaçamento, arranjo e idade de corte. Avaliando o efeito do arranjo de plantio no espaçamento de 12 m² planta⁻¹ observou-se que, com exceção do clone 1213 em São João Evangelista, o arranjo de plantio de 6 x 2 m apresentou maiores valores de IMAcel, sendo em média 17,6 % e 9,2 % superior em Belo Oriente e São João Evangelista, respectivamente. No entanto, maiores retangularidades tendem a reduzir a produtividade, uniformidade do “stand” e aumentar os riscos com quebra por vento e mato-competição (Stape, 2004).

Produção de biomassa e serapilheira

A produção média de massa seca da parte aérea do eucalipto foi de 359,1 t ha⁻¹ para São João Evangelista e de 252,2 t ha⁻¹ para Belo Oriente. A produção de massa seca de lenho observada em São João Evangelista foi de 318,2 t ha⁻¹ e em Belo Oriente de 211,7 t ha⁻¹ (Figura 5a). Estes valores representam 88,5 % e 83,4 % da massa seca total produzida em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente (Figura 5b). O espaçamento influenciou a massa seca de lenho apenas para o clone 1213 em Belo Oriente. A partição relativa para o lenho não foi influenciada pelo espaçamento. Avaliando o arranjo de plantio para o espaçamento de 12 m² planta⁻¹, observou-se maiores valores de massa seca de lenho para o arranjo de 6 x 2 m, com exceção do clone 1213 em Belo Oriente, que foi menor que 4 x 3 m.

A massa seca de folhas não foi influenciada pelo espaçamento em ambas as regiões e clones estudados (Figura 6a), ficando, em média, em 4,68 t ha⁻¹, sendo 5,40 t ha⁻¹ em São João Evangelista e 3,97 t ha⁻¹ em Belo Oriente. Em relação à partição relativa para as folhas, obteve-se média de 1,54 % da massa seca total da árvore média, sendo 1,57 % em Belo Oriente e 1,50 % em São João Evangelista (Figura 6b). Apenas o clone 7434 foi influenciado pelo espaçamento, sendo que quanto maior o espaçamento maior foi a partição para as folhas.

Observaram-se valores médios de massa seca de casca de 24,1 e 17,2 t ha⁻¹ em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente (Figura 6c). O espaçamento influenciou de forma linear e negativa a massa seca de casca dos clones 57 e 7434 e de forma quadrática a do clone 1213 em Belo Oriente. Apenas a massa seca de casca do clone 1213 em São João Evangelista não foi influenciada pelo espaçamento de plantio. O arranjo de 6 x 2 m foi o que mostrou maiores valores

deste componente no espaçamento de $12 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$, exceção apenas para o clone 1213 em São João Evangelista. Em relação à partição relativa para a casca, valores entre 6,82 e 6,72 % foram observados para Belo Oriente e São João Evangelista (Figura 6d). Apenas para o clone 1213 em Belo Oriente não houve efeito do espaçamento, ao passo que para o clone 57 e 7434 a resposta ao espaçamento foi linear e negativa e quadrática para o clone 1213 em São João Evangelista, indicando que em espaçamentos menores, há uma tendência de maior alocação de C para a casca.

Maiores valores de massa seca de galhos foram observados em Belo Oriente ($19,33 \text{ t ha}^{-1}$) em relação a São João Evangelista ($11,36 \text{ t ha}^{-1}$) (Figura 6e). O espaçamento de plantio influenciou apenas a massa seca de galhos do clone 1213 em Belo Oriente de forma quadrática, mas este mesmo clone não teve a partição relativa deste componente afetada pelo espaçamento (Figura 6f). Apenas o clone 57 foi afetado de forma linear e positiva pelo aumento do espaçamento. Em Belo Oriente, o percentual de galho em relação a massa seca total foi de 8,10 %, valor bem superior ao encontrado em São João Evangelista (3,19 %). A pouca diferença na partição dos componentes da parte aérea da árvore média evidencia a importância do melhoramento genético para o eucalipto devido à maior estabilidade na alocação de C dos clones.

A produção média de massa seca de serapilheira em São João Evangelista foi de $15,8 \text{ t ha}^{-1}$ enquanto que a observada em Belo Oriente foi de $11,1 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 4). Em geral, há estreita relação entre crescimento florestal e a produção de massa seca de serapilheira (Miller, 1984; Gonçalves et al., 1997). Assim, como maiores produtividades em São João Evangelista, maiores valores de massa seca de serapilheira também foram observadas nesse sítio. Da mesma forma que a produção volumétrica de lenho, o clone 1213 em ambos os ambientes apresentou menor produção de serapilheira. Este clone foi influenciado de forma linear e negativa em relação ao aumento do espaçamento. Não foi observado efeito do espaçamento na produção de serapilheira para os clones 57 e 7434. Em relação ao arranjo de plantio para o espaçamento de $12 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$, onde houve efeito do espaçamento, observou-se maiores valores de massa seca de serapilheira para o arranjo de $6 \times 2 \text{ m}$, acompanhando a resposta do volume do lenho.

Frações da matéria orgânica do solo

O teor de Carbono Orgânico Total (COT) do solo em Belo Oriente, aos 11 anos e 3 meses de idade, foi de 20,12 g kg⁻¹ na camada de 0-10 cm de solo (Figura 7a) e de 17,46 g kg⁻¹ na camada de 10-20 cm de solo (Figura 7b). No solo de São João Evangelista o teor médio de COT, considerando os dois clones, foi de 40,93 g kg⁻¹ na camada de 0-10 cm de solo e de 38,66 g kg⁻¹ na camada de 10-20 cm de solo. Estes valores foram 103 % e 121 % superior aos encontrados em Belo Oriente nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de solo, respectivamente. Esta diferença entre as regiões parece ser devido ao fato de que na região de Belo Oriente são encontradas menores produtividades, menor input de matéria orgânica (menor massa seca de serapilheira) (presente estudo; Gatto et al., 2010) e maior taxa de decomposição da matéria orgânica devido as maiores temperaturas médias anuais (Lima et al., 2006). Além disso, pode se hipotetizar que a menor capacidade de retenção do C derivado dos resíduos do eucalipto possa ser devido à mineralogia caulínica em relação àquela mais oxidada do solo de São João Evangelista. De modo geral, o COT não foi influenciado pelo espaçamento. O fato do espaçamento não ter influenciado os teores de COT pode ser decorrente das alterações no teor de COT ocorrerem paulatinamente, na ordem de décadas. Além disso, pequenas alterações no COT em curto prazo são difíceis de detectar devido à variabilidade natural no solo (Mendham et al., 2002).

O teor de COPK médio foi de 2,88 g kg⁻¹ na camada de 0-20 cm de solo. Em São João Evangelista, o teor de COPK da camada de 0-10 cm foi de 3,15 g kg⁻¹ (Figura 7c) e na camada de 10-20 cm foi de 2,96 g kg⁻¹ (Figura 7d). Em Belo Oriente, estes valores foram 2,92 e 2,55 g kg⁻¹ para as camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente. De modo geral, o espaçamento não influenciou os teores de COPK, o que não era esperado, pois estas frações mais lábeis respondem mais precocemente aos aportes de C e podem ser utilizadas como indicadoras de mudanças futuras no COT de acordo com o manejo adotado (Blair et al., 1995; Moody et al., 1997; He et al., 2008; Xu et al., 2008). No entanto, é possível que não apenas os componentes mais lábeis da MOS estejam sendo oxidados pelo permanganato de potássio. Segundo Tirol-Padre & Ladha (2004), as soluções de permanganato de potássio podem oxidar compostos orgânicos de baixa biodisponibilidade (ex: lignina) em relação aos carboidratos de maior solubilidade e labilidade, indicando que este método pode superestimar a labilidade de compostos estruturalmente mais

complexos. Em solos sob florestas plantadas, como no presente estudo, uma fração significativa dos resíduos aportados ao solo é constituída por lignina (Pegoraro et al., 2010) e, potencialmente, esses compostos podem ter sido oxidados nos solos de Belo Oriente e São João Evangelista. Mesmo assim, esperar-se-ia maiores valores de COPK nos tratamentos mais produtivos e com maior aporte de litter de parte aérea e raízes, o que não foi constatado. Segundo Skjemstad et al. (2006), a solução de permanganato de potássio embora seja efetiva para diferenciar o COPK de acordo com o tipo de cobertura vegetal do solo ela se mostrou pouco sensível para avaliar ganhos rápidos nos teores de C orgânico em solos degradados.

Em relação à labilidade da matéria orgânica, observou-se que, em média, o percentual de COPK em relação ao total (COPK/COT) foi de 15,04 % na camada de 0-10 cm na região de Belo Oriente e de 7,80 % em São João Evangelista (Figura 7e). No entanto, a labilidade do C, de modo geral, não foi influenciada pelo espaçamento em ambas as camadas. Na camada de 10-20 cm de profundidade, observou-se que, em média, o percentual de COPK do total foi de 14,62 % na região de Belo Oriente e de 7,82 % em São João Evangelista (Figura 7f). Foram observados valores de 13,03 % de COPK/COT para o solo cultivado com o clone 1213 e valores de 16,21 % para aquele cultivado com o clone 57 em Belo Oriente.

O teor médio de Nitrogênio Total (NT) na camada de 0-10 cm em Belo Oriente foi de 1,65 g kg⁻¹, o que representa 62 % do NT do solo de São João Evangelista na mesma camada (Figura 8a). Os teores de NT não foram influenciados pelo espaçamento. Na camada de 10-20 cm do solo o teor médio de NT foi de 1,55 g kg⁻¹ em Belo Oriente e de 2,46 g kg⁻¹ em São João Evangelista (Figura 8b), sendo este último valor 59 % superior ao encontrado em Belo Oriente.

O teor de NOPK na camada de 0-20 cm do solo foi de 0,22 g kg⁻¹. Na camada de 0-10 cm de profundidade, valores em torno de 0,27 g kg⁻¹ e 0,18 g kg⁻¹ foram observados em solos de São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente (Figura 8c). O N liberado pela oxidação do C da MOS com KMnO₄ pode ser um estimador da capacidade supridora de N no solo (Maia & Cantarutti, 2003), podendo haver maior potencial de fornecimento de N para as plantas de eucalipto em São João Evangelista. Não foram observadas diferenças no NL para os solos cultivados com os clones em distintos espaçamentos em ambas as regiões e profundidades do estudo. Na camada de 10-20 cm de profundidade foram observadas médias para NL de 0,23

g kg⁻¹ e 0,20 g kg⁻¹ em São João Evangelista e Belo Oriente, respectivamente (Figura 8d).

A proporção relativa do NL em relação ao NT (NL/NT) na camada de 0-10 cm foi de 10,82 % no solo em São João Evangelista e de 11,02 % naquele de Belo Oriente, não sendo essa relação afetada pelo espaçamento (Figura 8e). Já na camada de 10-20 cm, os valores encontrados foram de 9,43 e 12,88 %, respectivamente, para os solos de São João Evangelista e Belo Oriente, porém, no geral, sem efeito significativo do espaçamento (Figura 8f).

CONCLUSÕES

O espaçamento de 6 m² planta⁻¹ leva a maiores produções de volume e biomassa de lenho e IMAcel.

É viável a adoção de rotações mais longas para eucalipto visto que as variáveis relacionadas à produtividade foram superiores, ou no mínimo mantidas, aos 11 anos em comparação aos 6 anos de idade.

A alocação de C nos compartimentos da planta, em geral, não é afetada pelo espaçamento de plantio, mas é bastante influenciada pelo local de cultivo; há menor proporção alocada para o lenho na região de Belo Oriente.

Os teores de C orgânico e nitrogênio total, bem como COPK e NOPK são maiores no solo cultivado com eucalipto em São João Evangelista do que naquele de Belo Oriente, mas estes não são influenciados pelo espaçamento de plantio.

AGRADECIMENTOS

À Celulose Nipo-Brasileira (CENIBRA), pela disponibilidade das áreas para o experimento e apoio na coleta dos dados.

À FAPEMIG e ao CNPq pelo contínuo suporte financeiro às pesquisas em nossos laboratórios.

LITERATURA CITADA

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Bol. Inf. SBCS, 25:27-34, 2000.

- ASSOCIATIONS OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS – AOAC. Official methods of analysis of the Associations of Official Analytical Chemists. 12.ed. Washington, D.C., 1975. 1024p.
- BALLONI, E.A. & SIMÕES, J.W. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. IPEF, v.3, p. 1-26, 1980.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. Soil Till. Res., 54:101-109, 2000.
- BERGER, R. Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul. 110p. 2000.
- BERGER, R.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G. & HASELEIN, R. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. Ciência Florestal, v. 12, n. 2, p.75-87, 2002.
- BERNARDO, A.L. Crescimento e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp sob diferentes espaçamentos na região de cerrado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 1995.
- BERNARDO, A.L.; REIS, M.G.F.; REIS, G.G.; HARRISON, R.B. & FIRME, D.J. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. Forest Ecology and Management, v. 104, p. 1-13, 1998.
- BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B. & LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of carbon management index for agricultural systems. Australian Journal of Agricultural Research, v. 46, p. 1459-1466, 1995.
- BRAGA, J.L.; & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. R. Ceres, 21:73-85, 1974.
- BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen – Total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis, 2.ed. Part 2. Madison, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.595-624.
- DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Metodologia. Viçosa, UFV. Imprensa Universitária. 1997. 26p. (Boletim de Extensão 29).
- DEMOLINARI, M.S.M. Transferência do carbono de resíduos da colheita de eucalipto para as frações da matéria orgânica do solo. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2008. (Dissertação de Mestrado)

- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KÖGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no till cropping systems and N fertilisation. *Plant Soil*, v.268, p.319-328, 2005.
- FORRESTER, D.I.; MEDHURST, J.L.; WOOD, M.; BEADLE, C.L. & VALENCIA, J.C. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from *Eucalyptus* plantations: An Australia perspective. *Forest Ecology and Management*, v. 259, p. 1819-1835, 2010.
- GATTO, A.; Barros, N. F.; Novais, R. F.; Silva, I. R.; Leite, H. G.; Leite, F. P.; Villani, E. M. A. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 4, p.1069-1079, 2010.
- GERRAND, A.M.; NEILSEN, W.A. & MEDHURST, J.L. Thinning and pruning eucalyptus plantations for sawlog production in Tasmania. *Tasforests*, v. 9, p. 15-34, 1997.
- GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S. & NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: Nambiar, E.K.S.; Brown, A.G. (Eds.). *Management of Soil, water, and nutrients in Tropical plantation forest*. ACIAR Monograph 43, p. 379-418, 1997.
- HE, Y.; XU, Z. H., CHEN, C. R.; BURTON, J.; MA, Q.; GE, Y.; XU, J. M. Using light fraction and macroaggregate associated organic matters as early indicators for management-induced changes in soil chemical and biological properties in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia. *Geoderma* 147:116-125, 2008.
- LEITE, F.P.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SANS, L.M.A. & FABRES, A.S. Relações hídricas em povoamento de eucalipto com diferentes densidades populacionais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 9-16, 1999.
- LEITE, F.P.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & VILLANI, E. M. A. Nutrient relations during an eucalyptus cycle at different population densities. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 949-959, 2011.
- MAIA, C.E. & CANTARUTTI, R.B. Disponibilidade de nitrogênio pela oxidação do carbono lábil com permanganato de potássio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 3, p. 489-493, 2003.
- MELLO, H.A; RENSI COELHO, A. S.; CIERO NETTO, A.; SIMÕES, J. W.; BERGER, R. & COUTO, H. T. Z. Influência da espécie, do espaçamento e da idade no custo de produção de madeira industrial. *IPEF, Piracicaba* (5): 17-28, 1972.

- MELLO, H.A.; MASCARENHAS SOBRINHO, J. & SIMÕES, J.W. Influência do espaçamento e da idade de corte na produção de madeira de eucalipto em solo de cerrado. IPEF, v. 13, p. 143-162, 1976.
- MENDHAM, D.S.; SANKARAN, K.V.; O'CONNELL, A.M. & GROVE, T.S. *Eucalyptus globulus* harvest residue management effects on soil carbon and microbial biomass at 1 and 5 years after plantation establishment. Soil Biology & Biochemistry, v. 34, p. 1903-1912, 2002.
- MENEZES, A. A. Produtividade do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2005. 98p. (Tese de Doutorado)
- MILLER, H. G. Dynamics of nutrient cycling in plantation ecosystems. In: ALDOUS, J. R. ed. Wood for energy: The implications for harvesting, utilization and marketing. Edinburg, Institute of Chartered Foresters, 1984. p. 137-146.
- MILLER, H. G. The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. Plant Soil, 168/169:225-232, 1995.
- MOODY, P.W.; YO, S.A. & AITKEN, R.L. Soil organic carbon, permanganate fractions, and the chemical properties of acidic soils. Australia Journal of Soil Research, v. 35, p. 1301-1308, 1997.
- OLIVEIRA NETO, S.N.; REIS, G.G.; REIS, M.G.F. & NEVES, J.C.L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. Revista Árvore, v. 27, n.1, p.15-23, 2003.
- PAUSTIAN, K., ANDREN, O.; JANZEN, H.; LAL, R.; SMITH, P.; TIAN, G.; TIESSEN, H.; VAN NOORDWIJK, M. & WOOMER, P. Agricultural soil as a C sink to offset CO₂ emissions. Soil Use and Management, 13:230-244, 1997.
- PEGORARO, R. F; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; FONSECA, S. Estoques de carbono e nitrogênio em frações da matéria orgânica de solos cultivados com eucalipto nos sistemas convencional e fertirrigado. Ciência Rural, v. 40, n. 2, p. 302-309, 2010.
- POST, W. M.; KWON, K. C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and Potential. Global Change Biology, v. 6, p. 317-328, 2000.
- SAHRAWAT, K.L. Nitrification in some tropical soils. Plant Soil, v.65, p.281-286, 1982.
- SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density and magnetic fractionations. Soil Science, Baltimore, v. 162, n. 11, p. 795-807, 1997.
- SIMÕES, J.W.; COELHO, A.S.R.; MELLO, H.A. & COUTO, H.T.Z. Crescimento e produção de madeira de eucalipto. IPEF, v.20, p. 77-97, 1980.

- SILVA, C. R. Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de *Eucalyptus* na região noderdeste do estado de São Paulo. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Dissertação de mestrado. 2005. 50 p.
- SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A. & PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications C-saturation of soils. *Plant Soil*, 241:155-176, 2002.
- SKJEMSTAD, J. O.; SWIFT, R. S.; MCGOWAN, J. A. Comparison of the particulate organic carbon and permanganate oxidation methods for estimating labile soil organic carbon. *Australian Journal of Soil Research*, Victoria, v. 44, n. 3, p. 255-263, 2006.
- STAPE, J.L. Espaçamento de plantio e dominância das árvores. In: Reunião Técnica do Programa Temático de Silvicultura e Manejo (PTSM). Telemaco Borba, n. 22, p. 16-22, 2004.
- STAPE, J.L. & BINKLEY, D. Insights from full-rotation Nelder spacing trials with *Eucalyptus* in São Paulo, Brazil. *Southern Forests*, v. 72, n.2, p. 91-98, 2010.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.; HAKAMADA, R.; FERREIRA, J.M.A. LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C. & AZEVEDO, M.R. The Brazil eucalyptus potential productivity project: influence of water, nutrients and uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, v. 259, p. 1684-1694, 2010.
- STATSOFT, INC. (2007). STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com.
- TIROL-PADRE, A.; LADHA, J. K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as na index of soil labile carbon. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 68, p. 969-978, 2004.
- XU, Z. H.; WARD, S.; CHEN, C. R.; BLUMFIELD, T.; PRASOLOVA, N.; LIU, J. X.; Soil carbon and nutrient pools, microbial properties and gross nitrogen transformations in adjacent natural forest and hoop pine plantations of subtropical Australia. *Journal Soils Sediments* 8:99-105, 2008.
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

Quadro 1. Características químicas do solo de acordo com diferentes espaçamentos de um Latossolo Vermelho em São João Evangelista – MG para os clones 1213 e 7434 e de um Latossolo Amarelo em Belo Oriente - MG para os clones 1213 e 57 aos 11 anos e 3 meses de idade do plantio

Região	Clone	Espaçamento (m ² planta ⁻¹)	pH (H ₂ O)	P -----mg dm ⁻³ -----	K -----	Na -----	Ca -----cmol _c dm ⁻³ -----	Mg -----	Al -----	SB -----	t	m	Zn -----mg dm ⁻³ -----	Cu -----	Fe -----	Mn -----	P rem -----
BO	1213	6	4,58	2,05	36,61	4,48	0,74	0,18	1,25	1,03	2,28	56,13	1,28	0,61	140,68	5,77	19,38
BO	1213	9	4,50	1,95	35,02	4,83	0,54	0,15	1,40	0,80	2,20	63,53	0,86	2,08	171,19	4,96	19,78
BO	1213	10	4,44	1,90	35,02	4,31	0,32	0,15	1,48	0,58	2,06	72,17	1,05	0,56	153,71	5,50	19,81
BO	1213	12	4,42	1,21	29,39	4,14	0,28	0,11	1,50	0,48	1,99	75,82	0,51	0,51	75,10	3,17	18,68
BO	1213	12	4,39	2,91	31,33	4,48	0,30	0,12	1,67	0,52	2,19	75,81	0,45	0,43	188,41	3,12	17,63
BO	1213	15	4,59	1,99	38,72	5,52	0,75	0,21	1,23	1,08	2,31	52,61	1,07	0,57	134,01	6,78	19,15
BO	57	6	4,27	1,88	28,09	8,92	0,38	0,16	1,42	0,64	2,06	69,58	0,84	0,66	199,67	6,61	20,71
BO	57	9	4,27	1,68	29,15	7,20	0,20	0,13	1,45	0,43	1,88	77,13	0,66	0,63	235,42	6,06	21,67
BO	57	10	3,77	1,77	27,63	5,52	0,16	0,09	1,56	0,35	1,90	81,87	0,62	0,51	258,90	2,49	21,89
BO	57	12	4,33	2,16	33,20	39,04	0,19	0,10	1,44	0,55	1,98	75,84	1,07	0,62	124,73	5,24	20,86
BO	57	12	4,46	3,73	28,60	7,37	0,46	0,17	1,17	0,73	1,90	62,50	0,64	0,67	259,55	6,66	23,36
BO	57	15	4,45	1,18	25,87	9,65	0,21	0,11	1,34	0,42	1,76	76,29	2,46	0,81	215,62	3,71	22,31
SJE	1213	6	5,12	1,22	25,36	3,73	0,74	0,43	1,36	1,25	2,61	52,72	0,25	0,09	60,97	4,19	7,94
SJE	1213	9	5,00	1,27	27,13	3,40	0,48	0,39	1,50	0,95	2,44	62,73	0,19	0,10	76,84	4,60	9,10
SJE	1213	10	4,99	1,05	25,54	3,57	0,50	0,33	1,64	0,92	2,56	66,39	0,18	0,10	88,35	4,43	8,01
SJE	1213	12	5,02	1,27	26,08	4,01	0,49	0,35	1,40	0,93	2,33	61,31	0,14	0,09	69,13	4,51	7,56
SJE	1213	12	5,02	0,89	23,41	3,06	0,37	0,31	1,49	0,74	2,24	68,02	0,19	0,09	69,05	3,84	7,26
SJE	7434	6	5,04	1,15	24,65	3,91	0,35	0,41	1,53	0,84	2,37	64,90	0,19	0,03	76,90	3,72	7,68
SJE	7434	9	5,10	0,77	24,82	4,25	0,37	0,39	1,30	0,84	2,14	61,73	0,21	0,05	67,66	3,26	8,50
SJE	7434	10	5,06	1,24	22,17	3,73	0,33	0,27	1,36	0,67	2,04	67,42	0,15	0,08	61,35	2,85	7,85
SJE	7434	12	5,01	0,64	20,23	3,74	0,19	0,24	1,26	0,51	1,77	69,64	0,16	0,05	48,71	2,52	7,37
SJE	7434	12	5,06	1,01	23,58	4,08	0,43	0,30	1,43	0,81	2,24	65,52	0,16	0,04	68,21	5,33	7,59

Quadro 2. Valores médios (clones 1213 e 7434) de Incremento médio anual (IMA) de 2 aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos em São João Evangelista – MG

Espaçamento (m ² planta ⁻¹)	Arranjo de plantio (m x m)	Idade (anos)									
		2	3,3	4,6	5,5	6,4	7,4	8,4	9,6	10,6	11,4*
-----IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)-----											
6	3 x 2	23	56	55	57	58	61	58	60	59	56 (63)
9	3 x 3	20	50	49	53	54	58	56	57	57	55 (60)
10	3,6 x 2,8	18	46	46	51	52	54	54	54	55	55 (57)
12	4 x 3	17	43	45	49	49	51	50	52	53	53 (53)
12	6 x 2	17	41	43	48	48	51	50	51	50	50 (54)

* Primeiro valor é estimado e segundo real (cubagem)

Quadro 3. Valores médios (clones 1213 e 57) de Incremento médio anual (IMA) de 2 aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos em Belo Oriente – MG

Espaçamento (m ² planta ⁻¹)	Arranjo de plantio (m x m)	Idade (anos)									
		2	3,3	4,5	5,5	6,3	7,3	8,3	9,4	10,6	11,4*
-----IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)-----											
6	3 x 2	44	41	44	46	48	50	45	47	48	48 (46)
9	3 x 3	34	33	33	34	34	34	31	31	35	36 (32)
10	4 x 2,5	34	32	35	37	38	41	37	40	40	41 (37)
12	4 x 3	28	28	31	34	35	36	33	36	37	38 (32)
12	6 x 2	29	26	31	33	37	38	34	37	37	39 (36)
15	6 x 2,5	27	24	26	31	35	36	34	36	38	39 (33)

* Primeiro valor é estimado e segundo real (cubagem)

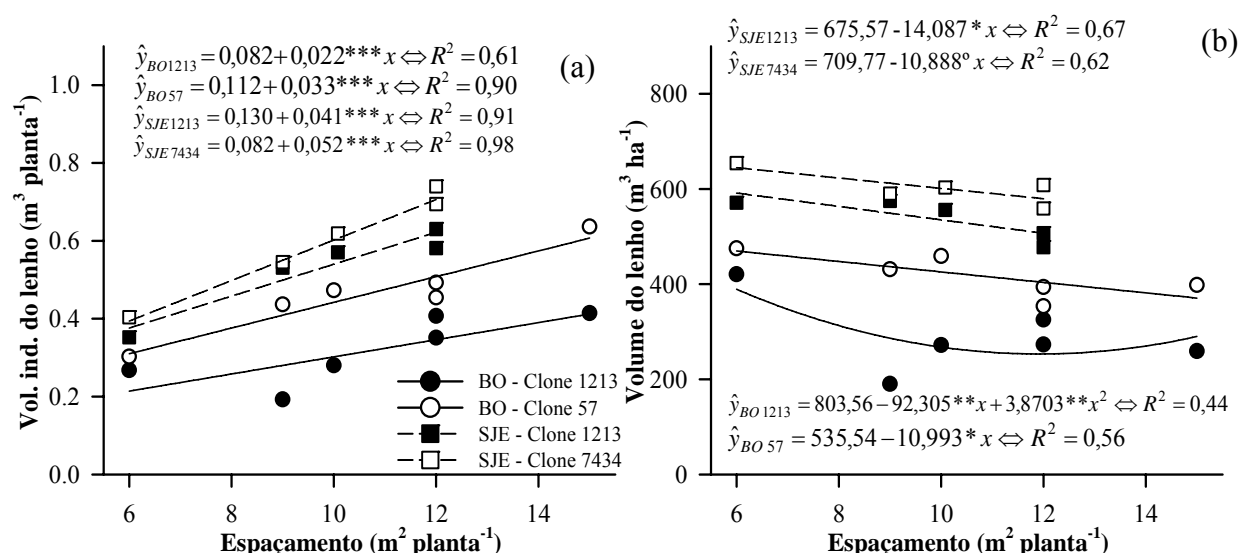


Figura 1. Volume individual do lenho (a) e volume do lenho por área (b) em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

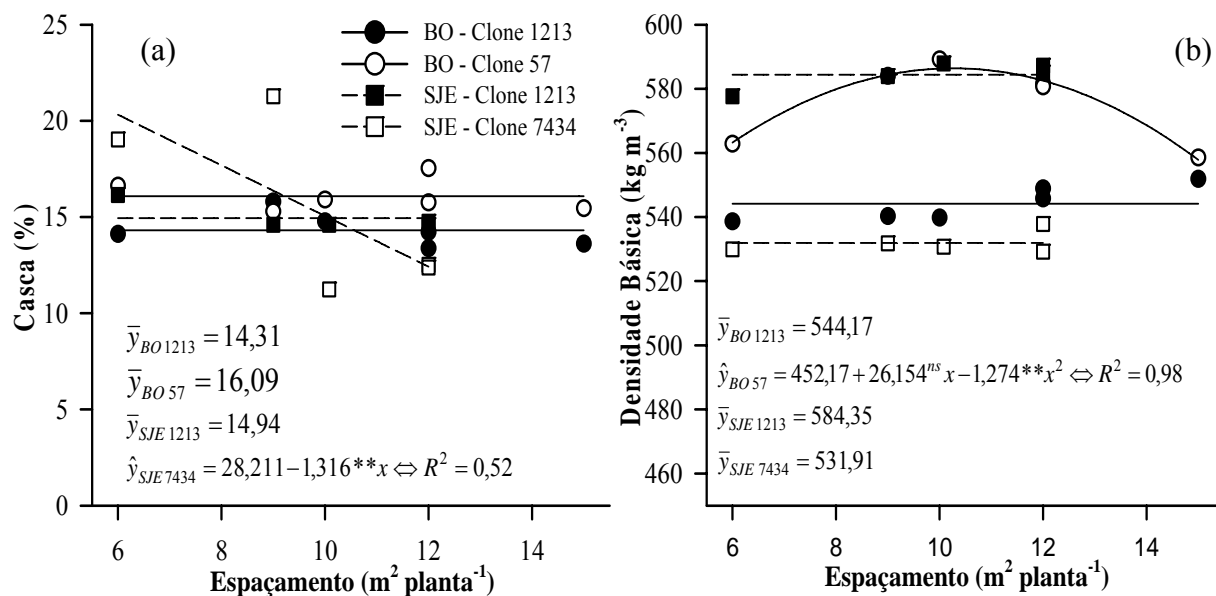


Figura 2. Percentual de casca (a) e densidade básica do lenho (b) em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos. **, ns: significativo a 1 % e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

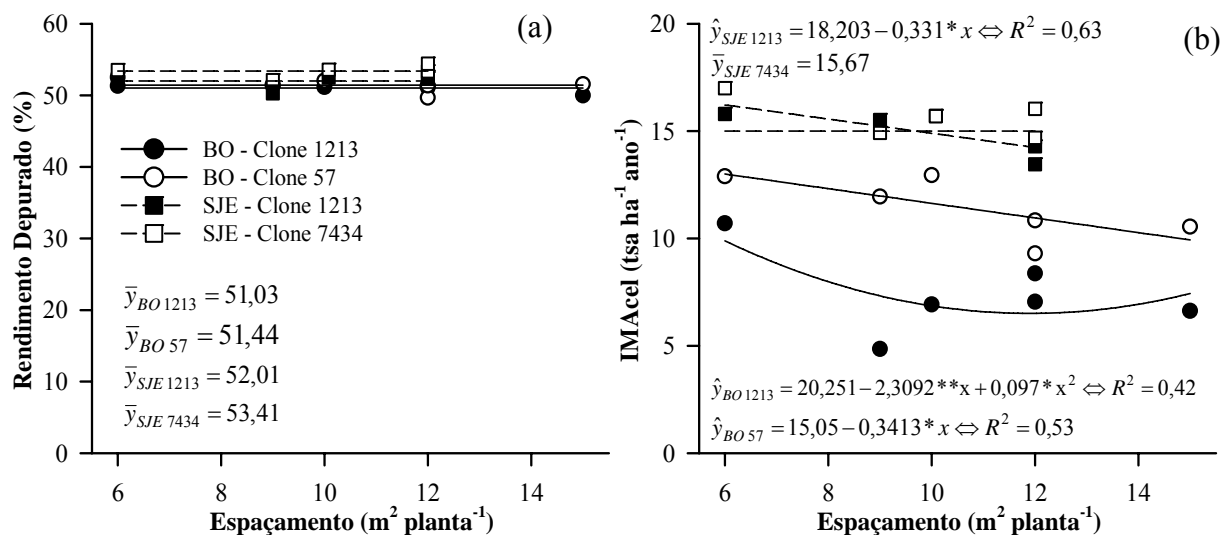


Figura 3. Rendimento depurado (a) e Incremento médio anual de celulose (b) em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos. **, *: significativo a 1, 5 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

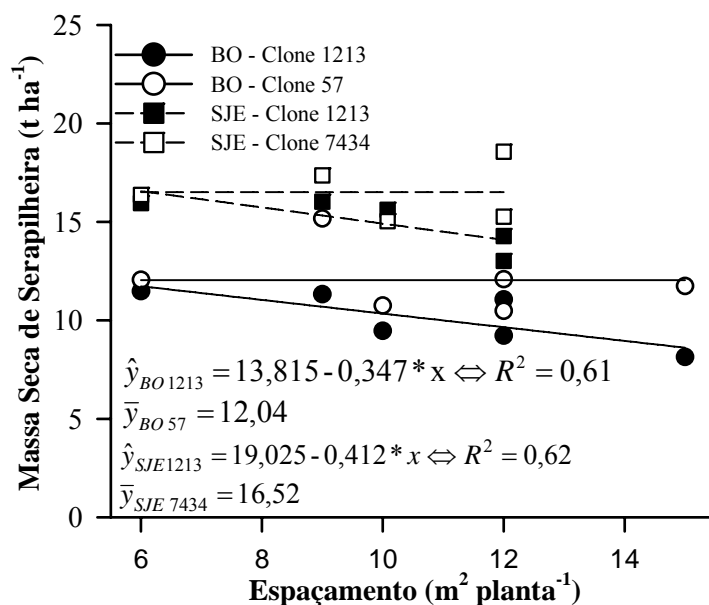


Figura 4. Massa seca de serapilheira em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos. *: significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

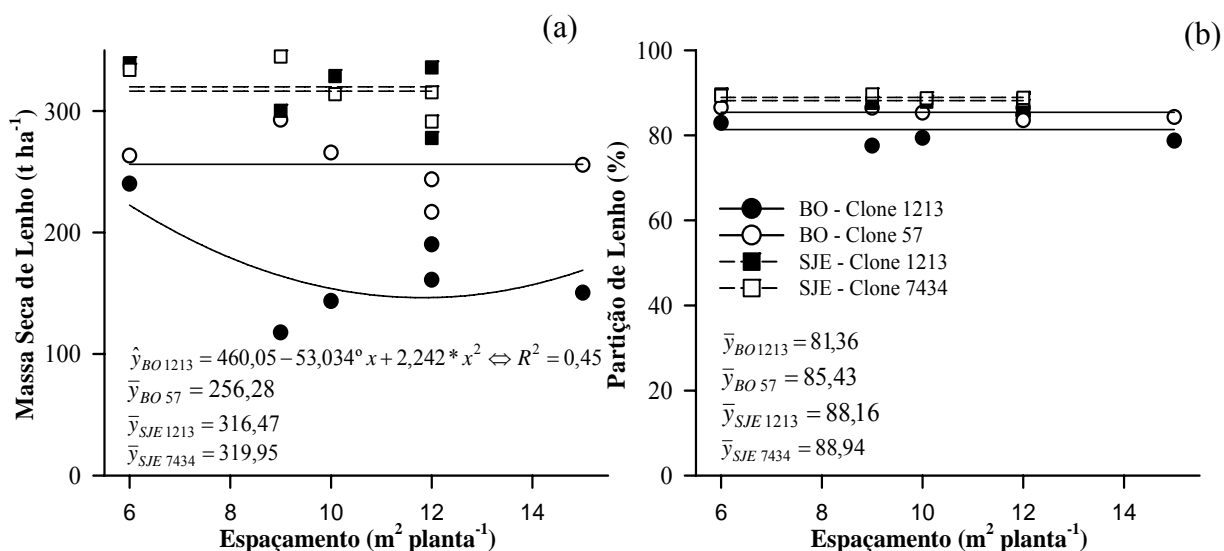


Figura 5. Massa seca (a) e partição de lenho (b) em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos. *, °, ns: significativo a 5 e 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

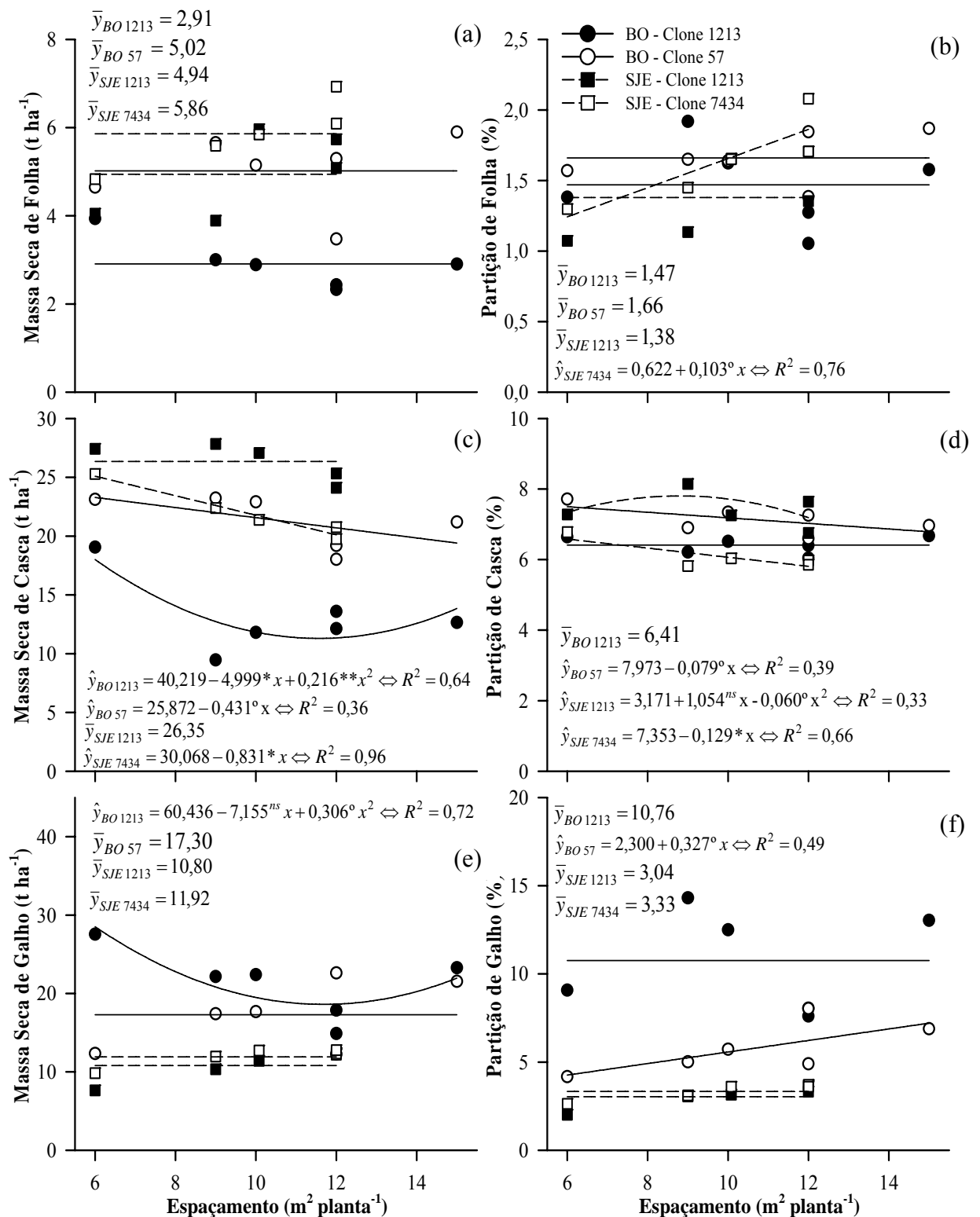


Figura 6. Massa seca e partição de folha (a, b), massa seca e partição de casca (c, d) e massa seca e partição de galho (e, f) em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos. **, *, °, ns: significativo a 1, 5, 10 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

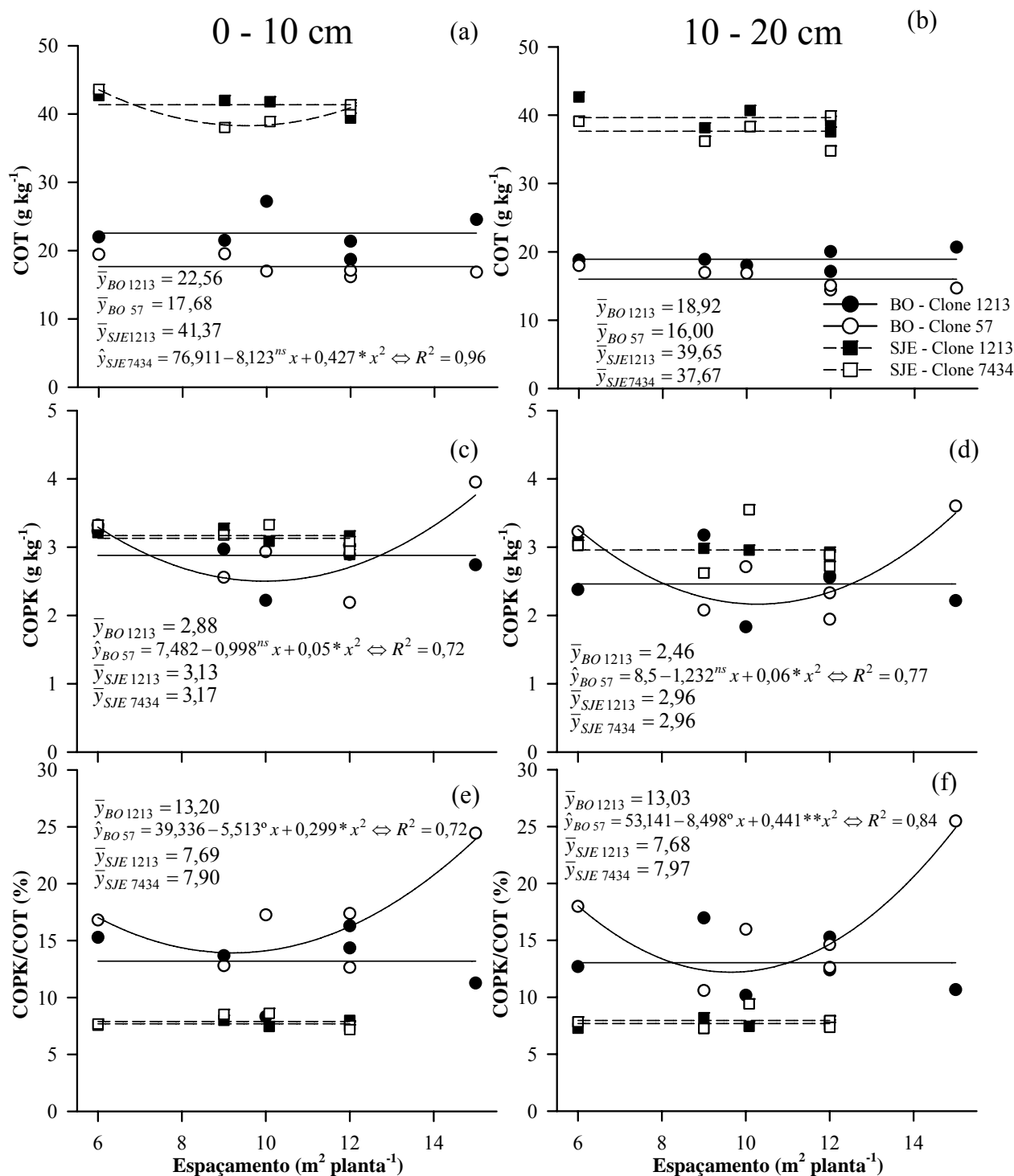


Figura 7. Carbono Orgânico total (COT), Carbono oxidável por permanganato (COPK) e relação de COPK/COT na profundidade de 0-10 cm (a, c, e) e na profundidade de 10-20 cm (b, d, f) em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos. **, *, °, ns: significativo a 1, 5, 10 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

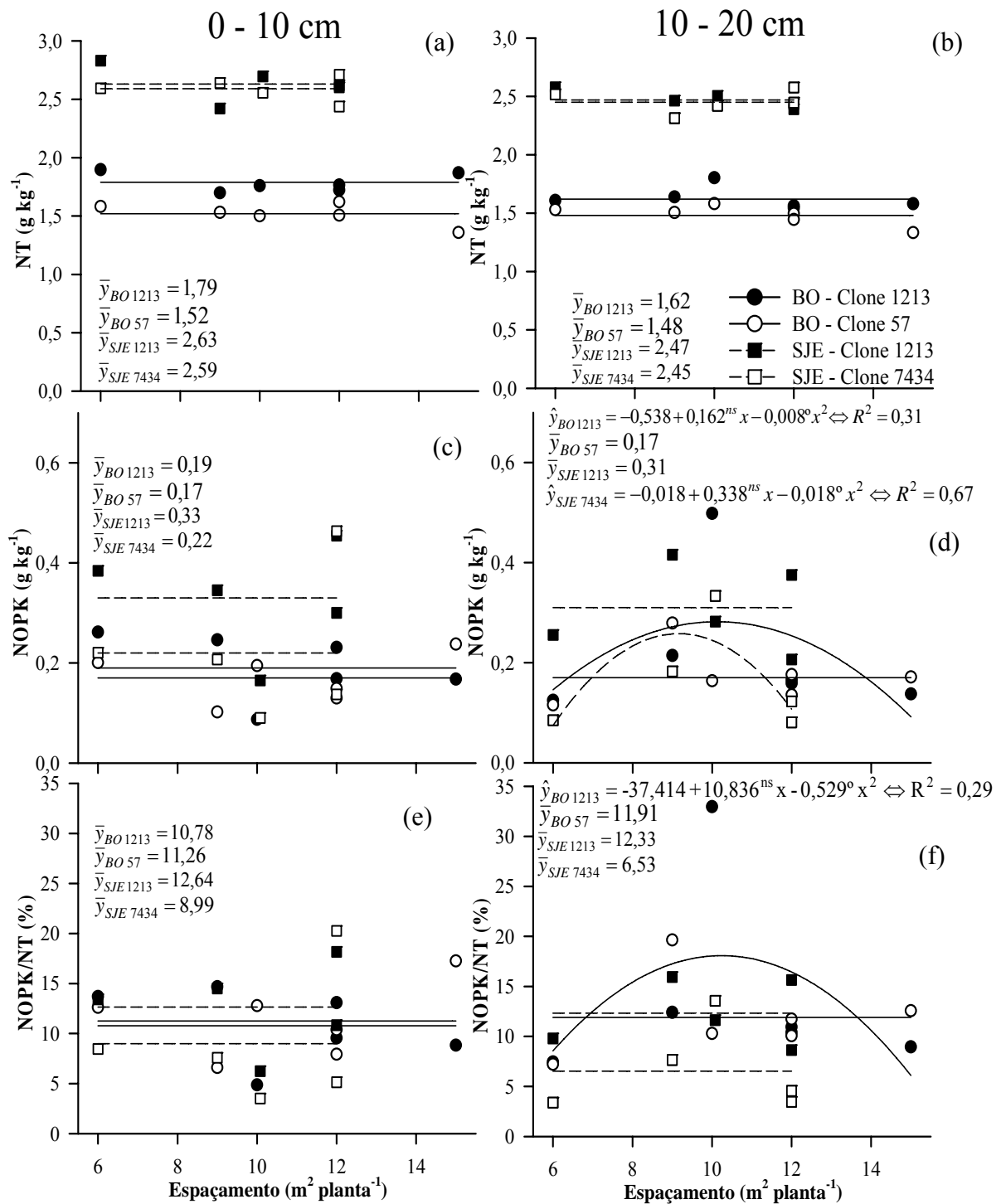


Figura 8. Nitrogênio Orgânico total (NT), Nitrogênio oxidável por permanganato (NOPK) e relação de NOPK/NT na profundidade de 0-10 cm (a, c, e) e na profundidade de 10-20 cm (b, d, f) em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos. °, ns: significativo a 10 % de probabilidade e não significativo até 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

ANEXOS

Anexo 1. Análise de variância dos tratamentos de massa seca e partição dos componentes da parte aérea e serapilheira em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos

F.V.	G.L.	Quadrado Médio								
		M.S. Serap.	M.S. Casca	M.S. Folha	M.S. Galho	M.S. Lenho	Partição Casca	Partição Folha	Partição Galho	Partição Lenho
Bloco (BO)	2	7977202°	0,290	0,539	9,330	257,000	0,078	0,202	5,448	9,100
Bloco (SJE)	2	30236910***	1,296	5,59279°	27,274	3152,146	1,5632**	0,198	1,119	0,484
Região	1	357644600***	788,3792***	33,67629***	1038,1657***	185562,5291***	0,005	0,049	423,4359***	435,3874***
Clone/BO	1	33613432,2110**	599,99***	39,8425***	147,69°	71475***	4,589***	0,320	222,646***	149,2***
Clone/SJE	1	17864436,6818*	148,0776***	6,25946°	9,476	90,931	13,1355***	0,478	0,607	4,637
Bloco x clone/BO	2	748192,269	23,63°	3,468	40,850	4361*	0,107	0,414	12,651°	14,600
Bloco x clone/SJE	2	3137713,000	4,114	1,071	6,278	586,324	0,204	0,092	0,347	0,226
Espaçamento/ BO	5	9250381*	25,38*	1,777	53,460	2769°	0,535	0,185	14,812*	16,7*
Espaçamento/SJE	4	3311008,000	16,9554°	3,368	14,595	1282,029	0,436	0,382	1,659	1,986
Clone x Espaçamento/BO	5	4770792,000	20,57*	1,480	63,020	4637*	0,110	0,186	15,912*	19,1*
Clone x Espaçamento/SJE	4	8327350*	3,913	1,078	1,205	2099,000	0,8274*	0,134	0,121	1,885
Resíduo	36	2948452,488	7,646	2,177	39,454	1338,778	0,295	0,195	4,890	6,251

°, *, **, ***: significativo a 10, 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Anexo 2. Análise de variância dos tratamentos de características dendrométricas em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos

F.V.	G.L.	Quadrado Médio									
		Vol. Ind. Tronco	Vol. Ind. Lenho	Percentual Casca	Vol. Tronco (ha)	Vol. Lenho (ha)	IMA c/ Casca	IMA s/ Casca	DB disco	RD	IMAcel
Bloco (BO)	2	0,009	0,007	0,080	3891	2889	30,2	22,43	299,000	1,600	1,661
Bloco (SJE)	2	0,01356°	0,0114*	53,056*	11915*	9644*	91,68*	74,2*	8,703	0,540	5,803°
Região	1	0,63901***	0,49877***	0,130	1002038***	763602***	7598,7***	5791,1***	66,320	35,5**	569,35***
Clone/BO	1	0,2826***	0,1948***	28,523	215615***	148442***	1673,74***	1152,29***	9186***	1,490	143,430***
Clone/SJE	1	0,0424**	0,0340**	0,933	43755***	32263***	336,68***	248,25***	20626,79***	14,66*	3,836
Bloco x clone/BO	2	0,0196*	0,01503*	1,519	14327*	11082*	111,21*	86,03*	263,000	0,680	9,454**
Bloco x clone/SJE	2	0,000	0,002	61,169*	291	2187	2,24	16,83	35,690	6,670	2,766
Espaçamento/ BO	5	0,0605***	0,046718***	0,860	21086***	15780***	163,68***	122,49***	206,000	1,900	11,087***
Espaçamento/SJE	4	0,09468***	0,082823***	35,709°	13815**	6238°	106,3**	48°	46,680	4,450	3,519
Clone x Espaçamento/BO	5	0,013373*	0,010628*	3,577	9890*	8275*	76,77*	64,24*	345,000	1,740	6,708**
Clone x Espaçamento/SJE	4	0,004	0,004	27,639	3125	2840	24,05	21,86	38,199	0,450	2,285
Resíduo	36	0,004	0,003	13,788	3273,895	2481,766	25,33085	19,19891	280,905	3,232	1,794452

°, *, **, ***: significativo a 10, 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Anexo 3. Análise de variância dos tratamentos das frações da matéria orgânica em São João Evangelista – MG (SJE) para os clones 1213 e 57 de eucalipto e em Belo Oriente – MG (BO) para os clones 1213 e 7434 de eucalipto, aos 11 anos e 3 meses de idade, em diferentes espaçamentos

F.V.	G.L.	COT	CL	Quadrado Médio			
				CL/COT	NT	NL	NL/NT
0-10 cm							
Bloco (BO)	2	0,940	0,209	10,485	0,018	0,002	16,721
Bloco (SJE)	2	283,38***	1,6727*	16,056	0,6527***	0,133651*	200,778*
Região	1	7082,79***	0,836	859,443***	15,0844***	0,149384*	0,694
Clone/BO	1	214,39***	0,052	122,355*	0,64881***	0,006	2,078
Clone/SJE	1	5,900	0,015	0,332	0,016	0,084551 ^o	100,033
Bloco x clone/BO	2	27,730	9,1118***	159,515**	0,012	0,006	30,893
Bloco x clone/SJE	2	4,530	0,987	4,409	0,001	0,001	0,484
Espaçamento/ BO	5	13,840	0,661	21,910	0,014	0,006	18,006
Espaçamento/SJE	4	9,730	0,118	0,810	0,042	0,089288*	170,888*
Clone x Espaçamento/BO	5	18,400	0,851	59,239*	0,030	0,014	67,687
Clone x Espaçamento/SJE	4	9,330	0,030	0,624	0,055	0,008	18,900
Resíduo	36	11,372	0,482	20,778	0,039	0,026	53,084
10-20 cm							
Bloco (BO)	2	34,14 ^o	0,591	9,052	0,17132 ^o	0,026	158,138
Bloco (SJE)	2	298,46***	2,0002 ^o	19,231	0,5535**	0,031	21,450
Região	1	7356,66***	2,7158 ^o	756,277***	13,6286***	0,025	194,930
Clone/BO	1	77,17*	0,332	91,183 ^o	0,179	0,017	33,609
Clone/SJE	1	29,400	0,000	0,634	0,003	0,160292*	252,698
Bloco x clone/BO	2	28,840	11,5936***	238,465***	0,004	0,070737 ^o	313,241*
Bloco x clone/SJE	2	2,200	0,955	8,879	0,108	0,067789 ^o	93,132
Espaçamento/ BO	5	3,680	0,450	20,667	0,039	0,038	157,220
Espaçamento/SJE	4	16,320	0,218	0,743	0,021	0,033	53,354
Clone x Espaçamento/BO	5	7,830	1,451 ^o	81,934*	0,009	0,032	167,235
Clone x Espaçamento/SJE	4	10,130	0,198	1,906	0,025	0,022	35,520
Resíduo	36	12,152	0,673	25,073	0,066	0,027	94,336

^o, *, **, ***: significativo a 10, 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

CAPÍTULO 3

ESTABILIZAÇÃO DO ^{13}C DO RESÍDUO DE EUCALIPTO EM SOLOS DISTINTOS: CONTRIBUIÇÃO DOS COMPONENTES DA PLANTA E DO DÉFICIT DE SATURAÇÃO DE CARBONO

RESUMO

A matéria orgânica está diretamente relacionada com a qualidade do solo e a sustentabilidade dos sistemas de produção em longo prazo. Nos sítios florestais a quantidade e a qualidade do resíduo que permanece na área influenciarão a entrada de C, sua taxa de decomposição e transferência para as frações da MOS. A demanda crescente pela remoção de resíduos de colheita de eucalipto para a produção de energia tem gerado preocupação, pois o maior retorno econômico com a remoção excessiva desses resíduos da área pode comprometer a MOS. Além disso, evidências na literatura sugerem que há um nível de saturação de C baseado nos processos físico-químicos que protegem ou estabilizam os compostos orgânicos do solo. O objetivo do presente estudo foi avaliar a estabilização do resíduo de colheita de eucalipto marcado com ^{13}C aplicado separadamente por componente da planta (folhas, galhos, raízes, cascas e lenho) em cinco solos de textura muito argilosa e mineralogia distinta provenientes de mata nativa para cinco níveis de déficit de saturação de C do solo (DSC). Os tratamentos resultaram de um esquema fatorial 5 x 5 x 6: cinco solos de regiões distintas; cinco profundidades (0-10; 10-20; 20-40; 40-60; 60-100 cm); e cinco resíduos de eucalipto (folhas, galhos, raízes, cascas e lenho) mais um testemunha sem resíduo. A eficiência de conversão do resíduo em MOS é maior em solos com maior DSC. A eficiência de estabilização do C do resíduo adicionado é maior na folha e casca e menor em solo com caráter mais caulínítico.

Palavras-chave: Matéria Orgânica, sustentabilidade florestal, colheita

SUMMARY

The organic matter is directly related with the soil quality and sustainability of long term production systems. In forest sites both quantity and quality of residue remaining in the area will influence the Carbon input, its decomposition rate and transference to the SOM fractions. The increasing demand for the removal of eucalyptus crop residues for energy production has raised concern, since the greatest economic return with the excessive removal of residues from the area may compromise the SOM. Furthermore, evidences in the literature suggest that there is a Carbon saturation level based on physical and chemical processes to protect or stabilize the soil organic compounds. The present study evaluates the stabilization of eucalyptus crop residue labeled with ^{13}C applied separately by plant components (leaves, twigs, roots, bark and wood) in five clayey soils with distinct mineralogy from native forest to five levels of soil Carbon Saturation Deficit (CSD). The treatments resulted in a factorial scheme 5 x 5 x 6: Five soils from distinct regions, five depths (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-100 cm) and five eucalyptus residues (leaves, twigs, roots, bark and wood) plus a control without residue. The conversion efficiency of residue in SOM is larger in soils with higher CSD. The efficiency of C stabilization of added residue is higher in leaves and bark and lower in soil with a more kaolinitic character.

Keywords: Organic Matter, forest sustainability, harvest

INTRODUÇÃO

A crescente demanda da sociedade por fontes de energia menos dependentes de fontes não renováveis tem fomentado a busca por alternativas de energia, reduzindo assim, o efeito estufa (Wilhelm et al., 2004). Nesse sentido, a agricultura é uma fonte de energia renovável por meio da produção de biomassa que pode ser usado como biocombustível (Lal, 2008), havendo uma demanda crescente pela remoção de resíduos de colheita de eucalipto para a produção de energia. No entanto, a remoção contínua de resíduos de plantas pode comprometer a qualidade do solo por promover decréscimos nos teores de matéria orgânica, uma vez que a mesma está bastante relacionada com a sustentabilidade de produção do sistema em longo prazo (Nambiar, 1996; Mendham et al., 2004). Assim, a quantidade e a qualidade do resíduo florestal que permanece na área influenciarão a dinâmica de C do sistema, devido à entrada de C, sua taxa de decomposição e transferência para as frações da matéria orgânica do solo (MOS), sendo uma das formas diretas de aumentar os estoques de MOS. Os estoques de C orgânico do solo também podem ser aumentados de maneira indireta por meio da fertilização e irrigação que aumentam a produtividade, produção de biomassa da parte aérea e do sistema radicular (Stewart et al., 2007).

O estudo da matéria orgânica do solo tem avançado com a utilização de isótopos estáveis. Segundo Balesdent et al. (1987), o uso da abundância natural do ^{13}C pode identificar a origem do C do solo, desde que a MOS formada reflita o material vegetal de origem. Assim, a origem da matéria orgânica do solo pode ser identificada uma vez que durante o processo de decomposição do resíduo vegetal foi observado que não ocorre discriminação isotópica do ^{13}C entre o material de origem e a MOS originada (Melillo et al., 1989). Porém, para utilizar essa técnica, é necessário que haja mudança na razão isotópica do C na MOS. Em espécies de mesma rota fotossintética é muito difícil se utilizar a abundância natural do ^{13}C , pois haverá pequenas ou nulas mudanças na razão isotópica.

Uma alternativa para utilizar a técnica do traçador isotópico seria o enriquecimento da planta com ^{13}C , como por exemplo, por meio do enriquecimento da atmosfera e fixação do $^{13}\text{CO}_2$. Dessa forma, é possível não apenas identificar em quais componentes da planta o $^{13}\text{C-CO}_2$ está sendo fixado, mas também traçar seu

destino no solo após sua incorporação, melhorando o entendimento da dinâmica e os mecanismos de estabilização da MOS.

A maioria dos modelos de dinâmica da MOS leva em consideração apenas a taxa de decomposição de vários compartimentos da matéria orgânica, o que significa apenas considerar a entrada de C no sistema para determinar os estoques de C (Stewart et al., 2007). Assim, os modelos preveem linearidade entre o input de C e os estoques de C orgânico do solo, ou seja, os estoques de C podem aumentar infinitamente, não havendo saturação de C no solo (Six et al., 2002). Isso aponta para uma eficiência de estocagem de C constante. De fato, muitos trabalhos da literatura com experimentos de campo ao longo do tempo em que se têm como tratamentos vários níveis de aporte de C ao sistema relatam essa linearidade (Larson et al., 1972; Paustian et al. 1997; Huggins et al. 1998; Bayer et al., 2000; Diekow et al., 2005; Kong et al. 2005). Porém, baseado nos processos físico-químicos, alguns trabalhos sugerem que há um nível de saturação de C (Six et al., 2002; Plante et al., 2006).

Considerando que a matéria orgânica pode ser estabilizada pela proteção bioquímica, dada pela recalcitrância do material, por proteção física dos agregados e proteção química, sendo esta última ocorrendo pela formação dos complexos organo-minerais, é de se esperar que a textura do solo esteja intimamente relacionada com estabilização da matéria orgânica do solo. O C orgânico estabilizado principalmente pela sorção das argilas representa boa parte do COT (Kahle et al., 2002) e possui tempo de ciclagem relativamente grande. A superfície específica do mineral também tem correlação positiva com o teor de COT (Kahle et al., 2002).

Assim, o presente estudo avaliou a estabilização do C derivado de resíduos de eucalipto marcados com ^{13}C aplicados separadamente por componente da planta (folhas, galhos, raízes, cascas e lenho), além de um tratamento sem adição de resíduo, em cinco solos de textura muito argilosa e mineralogia distintas sob condições de cinco níveis de déficit de saturação de C do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo e tratamentos

Este estudo foi desenvolvido em laboratório com condições controladas (25 ± 2 °C). Os tratamentos resultaram de um esquema fatorial $5 \times 5 \times 6$, sendo: cinco solos de regiões distintas; cinco déficit's de saturação de C de acordo com profundidade (0-10; 10-20; 20-40; 40-60; 60-100 cm); e cinco resíduos de eucalipto (folhas, galhos, raízes, cascas e lenho) mais um testemunha sem resíduo.

Para criar um índice de saturação de C e, a partir dele, déficits de saturação de C (DSC), foi necessário amostrar solos com características distintas em diferentes profundidades. Foram escolhidos cinco Latossolos, pois se esperaria menor variabilidade textural ao longo do perfil e alta proteção química e física da matéria orgânica do solo pela textura mais argilosa, sendo: Luís Antônio – SP classificado como Latossolo Vermelho distrófico; Curvelo – MG classificado como Latossolo Vermelho distrófico; Belo Oriente – MG classificado como Latossolo Amarelo distrófico; Bom Despacho – MG classificado como Latossolo Vermelho distrófico; Virginópolis – MG classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Os LV estão localizados no bioma Cerrado e o LA e o LV no bioma Mata Atlântica. Esses solos apresentam teores distintos de matéria orgânica, estavam sob vegetação nativa e a textura varia entre argilosa a muito argilosa (Quadro 1), pois nestas condições se esperava a expressão do potencial máximo de estocagem do C, assumindo que a camada mais superficial em cada solo teria um DSC = 0 (Quadro 2).

A amostragem de cada solo em cinco profundidades se fez necessária para se obter um gradiente de matéria orgânica, ou seja, de déficit de saturação de C dentro de cada solo, mas mantendo a mesma textura e mineralogia.

A dose de cada tipo de resíduo de eucalipto foi equivalente a 10 g de C para cada kg de solo.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com três repetições.

Análise do solo

As amostras de solo, antes da incubação, foram analisadas (Quadro 3) para determinação de pH em água na relação solo:solução de 1:2,5; Ca e Mg trocáveis extraídos com KCl a 1 mol L^{-1} na relação solo:extrator de 1:10 v/v; P e K extraídos

por Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$), na relação 1:10 v/v (Defelipo & Ribeiro, 1997). Os teores de P, após a formação do complexo fosfomolibdico e a sua redução por ácido ascórbico, foram determinados por colorimetria (Braga & Defelipo, 1974). Os teores de K foram determinados por fotometria de chama (AOAC, 1975) e de cálcio e magnésio por espectrofotometria de absorção atômica (AOAC, 1975). Os teores de sulfato do solo, após agitação por 45 min na relação solo:extrator de 1:2,5 v/v, foram determinados segundo método descrito por Alvarez V. et al. (2001). Os teores dos micronutrientes Fe, Mn, Zn, e Cu foram determinados utilizando-se espectrofotômetro de absorção atômica após extração com Mehlich-1, com exceção do B que foi extraído com água quente (65 °C) e quantificado pelo método colorimétrico. Subamostras de solo foram passadas em peneira de 100 mesh, para determinação de C e N total em espectrômetro de massa de razão isotópica de fluxo contínuo (ANCA-GSL, 20-20, Sercon, Crewe, UK).

O P remanescente foi determinado de acordo com metodologia descrita por Alvarez V. et al. (2000). A caracterização textural seguiu metodologia proposta por Ruiz (2005).

Resíduos de eucalipto

Os resíduos vegetais incubados com os solos foram provenientes de plantas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*). Estas plantas tinham 90 dias de idade, cultivadas em tubetes e transferidas para solução nutritiva de Clark (1975) com sistema de aeração constante e pH mantido a 5,5, onde permaneceram por 30 dias. Após este período, o processo de marcação das plantas com ^{13}C foi iniciado, sendo necessário porque a sua razão isotópica do C é similar àquelas dos solos sob mata nativa em virtude das plantas serem da rota fotossintética C3, o que inviabilizaria traçar o destino do C dos resíduos não marcados nos solos.

Marcação com ^{13}C

A marcação das plantas com ^{13}C foi realizada por planta em câmara de vidro de 448 dm^3 com atmosfera enriquecida com $^{13}\text{CO}_2$ (Machado, 2009). Foram dados pulsos de $^{13}\text{CO}_2$ (“pulse labelling”) deixando as plantas em contato com essa atmosfera por 6 a 10 horas. Ao longo do período de crescimento das mesmas, os pulsos de $^{13}\text{CO}_2$ foram repetidos para que houvesse melhor uniformidade da

marcação. Durante a marcação, o sistema era hermeticamente fechado evitando a entrada de CO₂ atmosférico, bem como, a perda de ¹³C. Para que ocorresse a fotossíntese e absorção do ¹³CO₂ pela planta era fornecida a mesma radiação fotossintetizante da câmara de crescimento onde elas estavam crescendo com auxílio de uma lâmpada halógena de 1.000 W, que fornecia uma irradiância de 340 μmol fótons cm⁻². Entre a lâmpada e a câmara, era mantida em circulação uma lâmina de água (8 cm) para restringir o aquecimento dentro da câmara proveniente da lâmpada, permitindo manter uma temperatura em torno de 24 °C.

Na câmara de vidro colocava-se a fonte de ¹³CO₂ na forma de Na₂¹³CO₃ em contato com H₂SO₄ para que ocorresse a evolução do ¹³CO₂. Para isso, após o acondicionamento das plantas, fechamento da câmara, realizado às 13 h, e absorção de CO₂ por 30 min injetava-se com seringa cromatográfica 10 mL da solução de Na₂¹³CO₃ a 0,18 mol L⁻¹ com 99 % de átomos de ¹³C em excesso através de um dos septos laterais da câmara de vidro em placa de Petri acondicionada dentro da câmara de vidro contendo 50 mL de H₂SO₄ a 3,8 mol L⁻¹. Para que ocorresse a homogeneização do ¹³CO₂ evoluído foi instalado um pequeno ventilador na câmara. Outros quatro pulsos de ¹³CO₂ foram efetuados com uma hora de intervalo. Uma hora após o 5^o pulso, aproximadamente às 19:00 h do dia, a lâmpada era desligada, iniciando o período escuro. Doze horas após iniciado o período escuro, aproximadamente às 7:00 h do dia seguinte, a lâmpada era ligada novamente, deixando-se ocorrer a absorção de CO₂, acumulado na câmara como consequência da respiração das plantas no período escuro, por um tempo necessário para que aproximadamente 80 % deste CO₂ fosse absorvido (Machado et al., 2011), variando de 6 a 10 h. Com isso, parte do ¹³C liberado na respiração noturna foi refixado. Após esse tempo, aproximadamente às 15 h do dia, as plantas eram retiradas da câmara de marcação e levadas para a casa de vegetação, permanecendo nesta até às 13 h do dia seguinte, quando eram trazidas de volta à câmara e reiniciada a marcação. Esse ciclo se repetiu três vezes por semana durante 126 dias.

Incubação

Após a caracterização dos solos, uma fertilização básica via solução (100 mg kg⁻¹ de N, 300 mg kg⁻¹ de P; 150 mg kg⁻¹ de K; 2 cmol_c kg⁻¹ de Ca; 0,8 cmol_c kg⁻¹ de Mg; 40 mg kg⁻¹ de S; 0,81 mg kg⁻¹ de B; 1,33 mg kg⁻¹ de Cu; 3,66 mg kg⁻¹ de Mn, 0,15 mg kg⁻¹ de Mo e 4 mg kg⁻¹ de Zn) foi feita em cada unidade experimental (de

cada profundidade de cada solo) após diluição de cinco vezes desta solução, procedendo-se a homogeneização, com o objetivo de nivelar a fertilidade dos solos. Além disso, foi feita uma suspensão de solo sob plantio de eucalipto (1 g solo/100 mL água deionizada) e aplicado em todas as unidades experimentais com o objetivo de inocular os solos provenientes de mata nativa com os micro-organismos presentes em áreas de cultivo com eucalipto. Outra suspensão foi feita com a camada superficial de cada solo aplicando-se nas demais profundidades do mesmo para inocular os micro-organismos presentes na camada superficial nos solos coletados em camadas mais profundas ao longo do perfil.

Os solos dos tratamentos foram acondicionados em potes de 150 mL, adicionando-se 20 g de solo em cada pote. Posteriormente, elevou-se a umidade para 80 % da capacidade de campo. Em seguida, o resíduo marcado (de plantas com idade de 8 meses) era adicionado em cada pote de acordo com o respectivo tratamento. O experimento foi conduzido por um ano, sendo os potes abertos semanalmente para renovação do ar ambiente.

Fracionamento da matéria orgânica do solo

Para determinar a contribuição do ^{13}C do resíduo para a MOS realizou-se o fracionamento físico da MOS, proposto por Cambardella & Elliot (1992), em que as amostras foram dispersas por meio da adição de 25 mL de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) por 15 h com esferas de vidro em agitador horizontal à 150 RPM e passadas em peneira de 53 μm para separação da fração matéria orgânica particulada protegida em microagregados (MOP), que ficava retida na peneira, da fração da matéria orgânica associada aos minerais (MOAM). A fração retida na peneira constitui o compartimento fisicamente protegido da MOS, pouco alterado e quimicamente mais parecido com os resíduos vegetais que lhe deram origem. A fração MOAM representa os compartimentos quimicamente e bioquimicamente protegidos da MOS.

Análise de C e N das frações

O teor total de C e N e a abundância de ^{13}C (δ) de cada fração obtida foram dosados em espectrômetro de massa de razão isotópica de fluxo contínuo (ANCA-GSL, 20-20, Sercon, Crewe, UK) e os resultados referenciados ao padrão internacional PDB, expressos em partes per mil (‰).

A proporção do C de cada fração da MOS que era derivada do eucalipto foi calculada de acordo com a equação (Stewart, et al., 2009):

$$f = (\delta_t - \delta_s) / (\delta_r - \delta_s)$$

em que:

$\delta_t = \delta^{13}\text{C}$ de cada fração da MOS ao fim de 12 meses;

$\delta_s = \delta^{13}\text{C}$ da fração da MOS no tratamento sem adição de resíduo;

$\delta_r = \delta^{13}\text{C}$ de cada componente do resíduo de eucalipto adicionado.

A quantidade de C do resíduo menor que 2 mm estabilizado de cada fração foi calculado multiplicando-se o fator (f) previamente obtido com o conteúdo de C obtido em cada fração. Assim, foi possível determinar a taxa de recuperação do C aplicado ao solo como resíduo de eucalipto nas frações MOP e MOAM da MOS.

O déficit de saturação de C (DSC) dos solos foi estimado assumindo que o teor de C da camada mais superficial estava próximo do nível de saturação (DSC=0) e que as camadas subsuperficiais apresentavam valores crescentes de DSC proporcionais às reduções nos seus teores de C (Quadro 2).

Análises estatísticas

Os dados de cada solo foram submetidos à análise de variância e, após desdobramento da interação dupla entre DSC e tipos de resíduo, por meio de regressões, avaliou-se o efeito do DSC e do tipo de solo na estabilização do ^{13}C do resíduo de colheita de eucalipto adotando-se o nível de significância de até 10 % com base no Quadrado Médio do Resíduo da análise de variância. Utilizou-se para o processamento dos dados o programa STATISTICA versão 8.0 (StatSoft, Inc., 2007).

RESULTADOS

O padrão de alocação e enriquecimento de ^{13}C entre partes das plantas de eucalipto utilizadas apresentou homogeneidade na composição isotópica nas diferentes partes das plantas, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ acima de 500 ‰, ou seja, um enriquecimento substancial quando comparado aos valores de abundância natural da ordem de -28 ‰ (Machado, 2009).

De maneira geral, os solos de Luís Antônio e de Virginópolis apresentaram maior conteúdo de C na fração da matéria orgânica particulada (MOP), sendo 2,4 e 4,2 g kg⁻¹, respectivamente. Nos solos de Curvelo, Belo Oriente e Bom Despacho, os conteúdos foram de 1,77; 1,75 e 1,79 g kg⁻¹, respectivamente. Em relação aos tratamentos sem resíduo, os solos de Luís Antônio, Curvelo, Belo Oriente, Bom Despacho e Virginópolis que tiveram resíduo adicionado apresentaram valores, respectivamente, 74,4; 151,7; 94,8; 117,5; 50,3 % superiores àqueles sem aplicação de resíduos. Em média, os tratamentos sem resíduo apresentaram valor de 1,31 g kg⁻¹ de C na MOP. Assim, do C adicionado, casca e folha levaram a menores incrementos (aumento de 56 e 46 %, respectivamente) enquanto que para galho, lenho e raiz os valores proporcionaram incrementos 95, 101 e 105 % superiores em relação aos tratamentos sem resíduo, indicando menor taxa de decomposição destes últimos componentes do resíduo.

Em todos os solos do presente estudo houve incremento no conteúdo de C na fração da matéria orgânica associada à fração mineral (MOAM) em relação aos tratamentos sem resíduo. Os conteúdos de C-MOAM médios (camadas de 0-60 cm) observados para os solos de Luís Antônio, Curvelo, Belo Oriente, Bom Despacho e Virginópolis foram de 16,4; 13,6; 11,9; 16,8; 33,7 g kg⁻¹, sendo 3,3; 10,9; 11,4; 9,2 e 14 % superiores aos tratamentos sem resíduo. Os valores dos tratamentos com casca, folha, galho, lenho e raiz foram 12,3; 16,6; 9,9; 9,9; 7,8 e 10,6 % superiores aos tratamentos sem resíduo, indicando maior incorporação do C derivado de folhas e casca à matéria orgânica mais estável do solo.

A contribuição (*f*) média de C do resíduo na MOP para todos os solos foi de 0,449 (ou 44,9 %), com os tratamentos do solo de Virginópolis apresentando menor média, independente do déficit de saturação de C e do resíduo ($\hat{y} = 0,239$) e os de Curvelo a maior média ($\hat{y} = 0,575$), enquanto que os tratamentos dos solos de Luís Antônio, Belo Oriente e Bom Despacho apresentaram valores médios de *f* iguais 0,436; 0,509 e 0,489 (Figura 1). Os solos dos tratamentos com folha foram os que apresentaram a menor proporção de C na MOP ($\hat{y} = 0,326$), independente do déficit de saturação de C e do solo, seguidos por aqueles que receberam aplicação de casca ($\hat{y} = 0,415$), galho ($\hat{y} = 0,471$), lenho ($\hat{y} = 0,497$) e raiz ($\hat{y} = 0,538$) (Figura 2). A proporção de C do resíduo na MOP foi influenciada significativamente pelo déficit de saturação de C (DSC) de forma linear e positiva de maneira geral, independentemente do resíduo e do solo (Figuras 1 e 2), sendo, em média, 177 %

maior para os maiores DSCs em relação ao menor DSC (da camada mais superficial). Apenas os tratamentos com resíduo de casca e folha no solo de Luís Antônio, resíduo de lenho nos solos de Curvelo, Bom Despacho e Virginópolis, de galho em Bom Despacho e de raiz em Virginópolis apresentaram resposta quadrática ao déficit de saturação de C (Figuras 1 e 2).

A proporção média de C do resíduo transferida para a MOAM para todos os solos foi de 0,073 (ou 7,3 %), com os tratamentos do solo de Virginópolis apresentando menor média, independente do déficit de saturação de C e do resíduo ($\hat{y} = 0,036$) e os de Belo Oriente a maior média ($\hat{y} = 0,097$), enquanto que os tratamentos dos solos de Luís Antônio, Curvelo e Bom Despacho apresentaram valores médios de 0,07; 0,09 e 0,07, respectivamente (Figura 3). Dos resíduos adicionados, os tratamentos com folha foram os que apresentaram a maior proporção de C na MOAM independente do déficit de saturação de C e do solo ($\hat{y} = 0,093$), seguido pela casca ($\hat{y} = 0,08$), raiz ($\hat{y} = 0,074$), galho ($\hat{y} = 0,066$) e lenho ($\hat{y} = 0,049$) (Figura 4). A ordem é bastante concordante para o caso de folha e casca, onde maiores valores foram encontrados para f MOAM e menores para f MOP, porém a ordem obtida para galho, lenho e raiz não foi necessariamente a inversa para os valores de f da MOP. De maneira geral, a proporção de C do resíduo na MOAM foi influenciada significativamente pelo DSC de forma linear e positiva, independentemente do resíduo e do solo (Figuras 3 e 4), sendo, em média, 165 % maior para os maiores DSC em relação ao máximo admitido de COT (adotando DSC=0 na camada de 0-10 cm). O solo de Luís Antônio apresentou comportamento quadrático em relação ao déficit de saturação de C, com exceção do tratamento com galho, onde a resposta foi linear. Da mesma forma, nos solos de Bom Despacho e de Virginópolis os valores de f apresentaram efeito quadrático em relação ao DSC, porém com resposta linear para galho e lenho em Bom Despacho e casca e lenho em Virginópolis. Nos solos de Curvelo e Belo Oriente o comportamento predominante para o efeito do DSC foi linear, com exceção do galho em Curvelo, e de folha e raiz em Belo Oriente, onde a resposta foi quadrática (Figuras 3 e 4).

Do total do C do resíduo de eucalipto transferido para o solo (MOP+MOAM), observou-se que a taxa de recuperação de C do resíduo na MOAM representavam, em média, 56,25 %. Porém a variação entre os solos foi baixa, obtendo-se 53,98; 55,11; 57,34; 57,5 e 57,33 % para os solos de Luís Antônio, Curvelo, Belo Oriente, Bom Despacho e Virginópolis, respectivamente (Figura 5).

Para os resíduos adicionados, independente do solo e do déficit de saturação de C, observou-se que a taxa de recuperação do C aplicado como resíduo de eucalipto na MOAM seguiu a seguinte ordem: folha (76,1 %) > casca (66 %) > galho (52 %) > raiz (46,1 %) > lenho (41,2 %) (Figura 6), sendo a ordem de folha e casca, novamente coerente com os resultados já apresentados para C MOP, C MOAM, *f* MOP e *f* MOAM. A taxa de recuperação de C do resíduo na MOAM relativa à MOP+MOAM foi influenciada significativamente pelo DSC de forma linear e positiva de maneira geral, independentemente do resíduo e do solo (Figuras 5 e 6). Ela foi, em média, 10,6 % maior para os maiores DSC em relação ao máximo de COT das camadas mais superficiais (DSC=0).

O solo de Luís Antônio apresentou comportamento quadrático em relação ao déficit de saturação de C quando se aplicou material de raiz, com máxima recuperação do C derivado do resíduo de eucalipto no maior valor de DSC, resposta linear e positiva para casca e folha, e nos tratamentos com galho e lenho não houve efeito do DSC (Figura 6). Da mesma forma, no solo de Curvelo observou-se resposta quadrática para casca, linear e positiva para tratamentos com folha e lenho, e sem efeito significativo para galho e raiz. O solo de Belo Oriente apresentou resposta quadrática para casca e lenho, linear e negativa para galho e raiz e sem resposta ao DSC para folha. Em Bom Despacho, apenas o tratamento com galho não foi influenciado pelo DSC, sendo a resposta linear e positiva para os demais, com exceção de casca, onde a resposta foi quadrática. Para o solo de Virginópolis, todos os tratamentos foram influenciados pelo DSC de forma linear e positiva, com exceção do lenho que apresentou efeito quadrático. Considerando a taxa de recuperação na situação de saturação de C para a de maior déficit dentro de cada solo, para uma média de resíduos, observou-se que houve incremento para todos os solos, com exceção daquele de Belo Oriente, com caráter caulínítico, onde a taxa de recuperação foi de 48,6 % frente aos 58,4 % obtidos na situação próxima da saturação. Nos demais solos, esses incrementos foram de 20,2; 8,3; 26,4 e 19,7 % para os solos de Luís Antônio, Curvelo, Bom Despacho e Virginópolis, respectivamente, solos com caráter oxidico.

DISCUSSÃO

A boa uniformidade de marcação dos diversos componentes da planta usando o resíduo de Machado (2009) estão de acordo com aqueles de Bromand et al. (2001) que estudaram a alocação de ^{13}C em plantas de trigo e não observaram diferenças do enriquecimento de ^{13}C nas diferentes partes das plantas. Valores acima de 500 ‰ de $\delta^{13}\text{C}$ em palhada de arroz duplamente marcada com ^{13}C e ^{15}N (Bird et al., 2003), bem como em resíduos de trigo (Stewart et al., 2009) tem sido reportados. Diante de valores elevados de ^{13}C (acima de 500 ‰) nos compartimentos das plantas utilizadas no presente estudo pôde-se, assim, buscar o entendimento da dinâmica dos compostos derivados das plantas na matéria orgânica do solo quando da sua incorporação ao mesmo.

Os resultados de C na fração MOP e MOAM indicam incremento nos teores de COT do solo com a adição de resíduo, o que já era esperado. Conforme já mencionado, o incremento de MOS está intimamente relacionado com a quantidade de C aportado no sistema (Paustian et al., 1997, Six et al., 2002).

A fração MOP responde de forma rápida e seletiva às mudanças de uso da terra e no manejo do solo (Cambardella & Elliott, 1994; Chan, 1997; Guggenberger & Zech, 1999; Lehmann et al., 2001; Franzluebbers & Stuedemann, 2002) sendo, assim, tido como um indicador sensível das mudanças ocorridas na matéria orgânica do solo, pois a MOP é um compartimento dinâmico, com C relativamente desprotegido e decorrente das recentes adições de resíduos de plantas (Lehmann et al., 2001). No entanto, parte da MOP pode ser fisicamente estabilizada dentro de agregados (Cambardella & Elliott, 1994), e parte pode consistir do C biologicamente estável (Skjemstad et al., 1990), sendo também importante para saber quanto do resíduo adicionado foi convertido em C na MOP em vez de ser perdido na forma de CO_2 .

Observou-se relação inversamente proporcional entre C recuperado do resíduo nas frações MOP e MOAM, ou seja, menores valores foram observados na MOP e maiores valores na MOAM, com maior magnitude de diferença para os componentes folhas e cascas. Esses menores valores de MOP indicam que a taxa de decomposição destes componentes é maior comparativamente aos demais.

O material orgânico de origem vegetal é de natureza complexa, porém sua composição elementar é bastante conhecida, sendo basicamente C, H, O, N, P e S que fazem parte das unidades estruturais dos tecidos (Guerra et al., 2008). A composição química do litter difere entre espécies de plantas e tipos de tecido,

variando assim, as proporções de proteínas, celulose, hemicelulose, amido, pectina, lipídeos e lignina, componentes formadores da MOS (Guerra et al., 2008) e, conseqüentemente, o padrão de decomposição e a qualidade da MOS formada de acordo com o resíduo. A fração solúvel em água e as proteínas são os primeiros a serem metabolizadas. Em seguida, celulose e hemicelulose são degradadas. Fontaine et al. (2004), usando um componente puro (celulose) enriquecido com ^{13}C , demonstraram que havia estímulo à ocorrência do efeito “priming” no C da MOS nativa do solo. Resíduos de plantas com maiores teores de lignina são mais empobrecidos com ^{13}C e apresentam baixas taxas de decomposição (Melillo et al., 1982), por isso, provavelmente, observou-se menor taxa de conversão de galho, lenho e raiz no presente estudo. Por outro lado, espera-se que resíduos e componentes mais lábeis contribuam menos de maneira direta para a formação da MOS que aqueles mais recalcitrantes.

Em condições de laboratório, foi constatado que resíduos menos lábeis (casca e galhos) contribuíram mais para a fração mais estável da MOS (Demolinari, 2008). Em estudo realizado na Bahia avaliando a dinâmica de decomposição de resíduos de colheita de eucalipto foi observado que na presença de casca, o resíduo combinado dos componentes da planta e com maiores teores de N reduziu a taxa de decomposição e que o componente folha apresentou a maior taxa de decomposição por ser um resíduo mais lábil e menos lignificado. Assim, resíduos de plantas de composição variável podem apresentar diferenças na decomposição e apresentar maior ou menor contribuição para a formação da MOS, sendo esse tipo de material a ser priorizado em campo pós colheita do eucalipto.

Neste sentido, estudos com o manejo de resíduos de eucalipto buscando o maior acúmulo de MOS devem ser realizados, uma vez que a decomposição do resíduo leva a formação de compostos mais estáveis e que são responsáveis pela estocagem de C no solo em longo prazo (Berg & McLaugherty, 2008). Ladeira (1999) estudando a produção de biomassa de espécies de eucalipto aos 84 meses de idade observou que são produzidos cerca de 10,0; 8,4 16,8 e 3,9 t ha⁻¹ de casca, galhos, raízes e folhas, respectivamente. No entanto, foi observado que a maior parte dos resíduos deixados na área após a colheita são folhas e galhos finos uma vez que casca e galhos grossos são destinados à produção de energia. Quando a casca de eucalipto é deixada na área, cerca de 40 a 60 t ha⁻¹ de resíduos permanece na área (Barros & Comerford, 2002) sendo, aproximadamente, de 20 a 30 % da biomassa

vegetal proveniente de casca. No presente estudo, apesar dos componentes folha e casca apresentarem maior conversão de C, deve-se salientar a importância da permanência da casca no ato da colheita, uma vez que, proporcionalmente, a casca contribuirá muito mais para a formação da MOS.

A diferença entre o nível de saturação teórico (tomado no presente estudo como a camada mais superficial de solos argilosos, provenientes de áreas de vegetação nativa) e o conteúdo atual de C do solo tem sido definida como sendo o déficit de saturação de C (Stewart et al., 2007). De acordo com esse conceito, quanto mais distante um solo está da saturação de C (maior o déficit de saturação), maior é o potencial de estocar C e maior o potencial de estabilizar o C adicionado (Hassink, 1996; Stewart et al., 2008) via resíduo de colheita. Por outro lado, um solo próximo da saturação de C estocará menos C, apresentando menor eficiência em relação ao C adicionado (Hassink & Whitmore, 1997; Stewart et al., 2007, 2008). Experimentos com solos com alto teor de C mostraram pequeno ou nenhum aumento no teor do C orgânico do solo mesmo com aumentos de duas a três vezes no input de C (Campbell et al., 1991; Paustian et al., 1997; Solberg et al., 1997). O presente trabalho está em concordância com os resultados destes trabalhos, uma vez que foi observado que quanto maior o déficit de saturação de C maior proporção de C derivado do resíduo foi encontrado na MOP e MOAM, resultando em maior taxa de recuperação do C do resíduo na matéria orgânica estável (MOAM).

No entanto, apesar do DSC contribuir de forma significativa para a conversão do C do resíduo em MOS estável, o teor de argila do solo também é importante para a estabilização do mesmo (Hassink, 1996). Assim, algumas propriedades físicas tais como: teor de silte + argila e microagregação do solo, bem como a complexidade bioquímica dos compostos orgânicos podem estar envolvidas na proteção do material orgânico dos organismos decompositores. Em solos aeróbios, o principal fator edáfico que contribuiu para a retenção de C orgânico do solo foi a textura (Zinn, 2005). Uma relação positiva e linear entre teor de C orgânico do solo e teor de silte + argila do solo foi observado em solos do Cerrado brasileiro (Zinn et al., 2005), bem como em solos tropicais caulíníticos (Feller & Beare, 1997). Neste sentido, como os solos do presente estudo apresentaram textura argilosa à muito argilosa, pressupõe-se que a estabilização do C do resíduo foi relativamente alta em todos os solos ao longo do perfil comparativamente com solos mais arenosos.

O teor de C orgânico do solo está inversamente relacionado com o tamanho das partículas do solo, ou seja, quanto menor o tamanho da partícula, maior o teor de C orgânico do solo (Zinn et al., 2007). Porém, essas propriedades e a proteção exercida parecem estar limitadas à superfície específica dos colóides, sendo bastante consistente com a ideia de saturação (Hassink, 1997). Corroborando com essa afirmação, alguns estudos com argilas puras têm encontrado um limite de estabilização para o material orgânico adicionado, que implica em um limite máximo de capacidade do solo para proteger o C pela adsorção das argilas (Harter & Stotzky, 1971; Marshman & Marshall, 1981).

Considerando que o C orgânico do solo é estabilizado principalmente pela sorção das argilas, deve-se considerar também que a atividade das argilas necessariamente afeta a retenção desse C orgânico (Zinn et al., 2007). A superfície específica do mineral é inversamente proporcional ao tamanho do mesmo. Minerais de menor tamanho também apresentam menor grau de ordenação e cristalinidade favorecendo ainda mais a adsorção (Ker, 1995). No entanto, esse controle mineralógico é muito pouco compreendido. Porém, os estoques de C orgânico do solo e a fração de C orgânico presente na fração argila correlacionaram positivamente com os óxidos de Fe na camada superficial do solo, bem como de óxidos de Al amorfos nas camadas subsuperficiais (Zinn et al., 2007). Estas afirmações confirmam os resultados do presente estudo, onde a estabilização do C dos solos oxídicos foi influenciada positivamente pelo DSC, mas no solo caulinitico o efeito foi negativo.

Trabalhos devem buscar o entendimento de fatores que afetam a eficiência de estabilização do C do resíduo adicionado para que, no futuro próximo, se otimize a utilização do resíduo da colheita em nível de talhão buscando maior retorno econômico e sustentabilidade produtiva.

CONCLUSÕES

A eficiência de conversão do resíduo de eucalipto em matéria orgânica é maior em solos com maior déficit de saturação de C e a estabilização ocorre principalmente na fração MOAM.

A eficiência de estabilização do C do resíduo adicionado é maior quando da aplicação de folhas e casca, mas, em condições de campo, este último será mais importante em função da massa muito maior aportada em comparação à primeira.

A eficiência de estabilização do C do resíduo adicionado é menor em solo com caráter caulínítico.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG e ao CNPq pelo contínuo suporte financeiro às pesquisas em nossos laboratórios.

LITERATURA CITADA

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo SBCS, 25:27-34, 2000.

ALVAREZ V., V.H.; DIAS, L.E.; RIBEIRO, F.S.; SOUZA, R.B. & FONSECA, C.A. Métodos de análises de enxofre em solos e plantas. Viçosa, MG, Editora UFV, 2001. 131p.

ASSOCIATIONS OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS – AOAC. Official methods of analysis of the Associations of Official Analytical Chemists. 12.ed. Washington, D.C., 1975. 1024p.

BALESDENT, J.; MARIOTTI, A. & GUILLET, B. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. Soil Biology and Biochemistry, 19:25-30, 1987.

BARROS, N.F. & COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Soc. Bras. de Ciência do Solo, Viçosa, Folha de Viçosa, 2:487-592, 2002.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. Soil Till. Res., 54:101-109, 2000.

BERG, B. & McCLAUGHERTY. Plant litter: Decomposition, húmus formation, carbon sequestration. 2nd edition. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008. 338 p.

BIRD, J.A.; VAN KESSEL, C. & HORWATH, W.R. Stabilization of ^{13}C -carbon and immobilization of ^{15}N -nitrogen from rice straw in humic fractions. Soil Sci. Soc. Am. J., v. 67, p. 806-815, 2003.

- BRAGA, J.L.; & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. *Revista Ceres*, 21:73-85, 1974.
- BROMAND, S.; WHALEN, J.K.; JANZEN, H.H.; SCHJOERRING, J.K. & ELLERT, B.H. A pulse-labelling method to generate ¹³C-enriched plant materials. *Plant Soil*, v. 235, p. 253-257, 2001.
- CAMBARDELLA, C.A. & ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56:777-783, 1992.
- CAMBARDELLA, C.A. & ELLIOT, E.T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58:123-130, 1994.
- CAMPBELL, C. A.; BOWREN, K. E.; SCHNITZER, M.; ZENTNER, R. P. & TOWNLEY-SMITH, L. Effect of crop rotations and fertilization on soil biochemical properties in a thick Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 71: 377–387, 1991.
- CHAN, K.Y. Consequences of changes in particulate organic carbon in Vertisols under pasture and cropping. *Soil Science Society of America Journal* , 61:1376-1382, 1997.
- CLARK, R.B. Characterization of phosphate of intact maize roots. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 23:458-460, 1975.
- DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Metodologia. Viçosa, UFV. Imprensa Universitária. 1997. 26p. (Boletim de Extensão 29).
- DEMOLINARI, M.S.M. Transferência do carbono de resíduos da colheita de eucalipto para as frações da matéria orgânica do solo. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2008. (Dissertação de Mestrado)
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KÖGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no till cropping systems and N fertilisation. *Plant Soil*, v.268, p.319-328, 2005.
- FELLER, C. & BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79:69–116, 1997.
- FONTAINE, S.& BARDOUX. G., BENEST, D., VERDIER, B., MARIOTTI, A. & ABBADIE, L. Mechanisms of the priming effect in a savannah soil amended with cellulose. *Soil Science Society of America Journal*, 68:125-131, 2004.
- FRANZLUEBBERS, A.J. & STUEDEMANN, J.A. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. *Environmental Pollution*, 116:53-62, 2002.
- GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A.; SILVA, L. S. & CAMARGO, F. A. O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.;

- CANELLAS, L. P. & CAMARGO, F. A. O., eds. 2. ed. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Metropole, p. 19-26, 2008.
- GUGGENBERGER, G. & ZECH, W. Soil organic matter composition under primary forest, pasture, and secondary forest succession, Region Huetar Norte, Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 124:93-104, 1999.
- HARTER, R. D. & STOTZKY, G. Formation of clay-protein complexes. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35:383-389, 1971.
- HASSINK, J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:487-491, 1996.
- HASSINK, J. & WHITMORE, A. P. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 131-139, 1997.
- HASSINK, J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*, 191:77-87, 1997.
- HUGGINS, D. R.; CLAPP, C. E.; ALLMARAS, R.R.; LAMB, J. A.; LAYESE, M. F. Carbon dynamics in corn-soybean sequences as estimated from natural carbon-13 abundance. *Soil Science Society of America Journal*, 62:195–203, 1998
- KAHLE, M; KLEBER, M & JAHN, R. Predicting carbon content in illitic clay fractions from surface area, cation exchange capacity and dithionite-extractable iron. *Eur J Soil Sci*, v.53(4), p. 639–644, 2002.
- KER, J.C. Mineralogia, sorção e desorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 181p, 1995. (Tese de Doutorado)
- KONG, A. Y. Y.; SIX, J.; BRYANT, D.C.; DENISON, R. F.; VAN KESSEL, C. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 69:1078–1085, 2005.
- LADEIRA, B.C. Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp, sob três espaçamentos, em uma seqüência de idades. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 148 p. (Dissertação de Mestrado em Ciência Florestal).
- LAL, R. Soil quality impacts of residue removal for bioethanol production. *Soil and Tillage Research*, 102:233–241, 2008.
- LARSON, W. E.; CLAPP, C. E.; PIERRE, W. H.; MORACHAN, Y. B. Effects of increasing amounts of organic residues on continuous corn: II. Organic carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur. *Agronomy Journal*, 64: 204–208, 1972.
- LEHMANN, J.; CRAVO, M.D.S.; ZECH, W. Organic matter stabilization in a Xanthic Ferralsol of the central Amazon as affected by single trees: chemical

- characterization of density, aggregate, and particle size fractions. *Geoderma*, 99:147-168, 2001.
- MACHADO, D. N. Enriquecimento e alocação de ^{13}C em plantas de eucalipto. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2009. 28p. (Dissertação de Mestrado)
- MARSHMAN, N. A. & MARSHALL, K. C. Bacterial growth on proteins in the presence of clay minerals. *Soil Biology & Biochemistry*, 13:127-134, 1981.
- MELILLO, J. M.; ABER, J. D.; LINKINS, A. E.; RICCA, A.; FRY, B.; NADELHOFFER, K. J. Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: Plant litter to soil organic matter. *Plant and Soil*, Dordrecht, 115:189-198, 1989.
- MELILIO, J. M.; ABER, J. D.; MURATORE, J. F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, Ithaca, 63:621-626, 1982.
- MENDHAM, D. S.; HEAGNEY, E. C.; CORBEELS, M.; O'CONNELL, A. M.; GROVE, T.S. & McMURTRIE, R. E. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. *Soil Biology & Biochemistry*, 36:1067-1074, 2004.
- NAMBIAR, E.K.S. Sustained productivity of forest is a continuing challenge to Soil Science. *Soil Science Society of America Journal*, 60:1629-1642, 1996.
- PAUSTIAN, K., ANDREN, O.; JANZEN, H.; LAL, R.; SMITH, P.; TIAN, G.; TIESSEN, H.; VAN NOORDWIJK, M. & WOOMER, P. Agricultural soil as a C sink to offset CO₂ emissions. *Soil Use and Management*, 13:230-244, 1997.
- PLANTE, A.F.; CONANT, R.T.; STEWART, C.E.; PASUTIAN, K. & SIX, J. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:287-296, 2006.
- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29:297-300, 2005.
- SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A. & PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications C-saturation of soils. *Plant Soil*, 241:155-176, 2002.
- SKJEMSTAD, J.O.; LE FEUVRE, R.P. & PREBBLE, R.E. Turnover of soil organic matter under pasture as determined by ^{13}C natural abundance. *Australian Journal of Soil Research*, 28:267-276, 1990.
- SOLBERG, E. D.; NYBORG, M.; IZAURRALDE, R. C.; MALHI, S. S.; JANZEN, H. H. & MOLINA-AYALA, M. Carbon Storage in soils under continuous cereal grain cropping: N fertilizer and straw. In *Management of Carbon Sequestration in Soil*. Eds. LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLETT, R. F. & STEWART, B. A. CRC Press, Boca Raton, FL, p 235–254, 1997.

- STATSOFT, INC. (2007). STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com.
- STEWART, C. E.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R. T.; PLANTE, A. F.; SIX, J. Soil C saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 86:19-31, 2007.
- STEWART, C. E.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R. T.; PLANTE, A. F. & SIX, J. Soil carbon saturation: Evaluation and corroboration by long-term incubations. *Soil Biology & Biochemistry*, 40:1741-1750, 2008.
- STEWART, C. E.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R. T.; PLANTE, A. F. & SIX, J. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. *Soil Biology & Biochemistry*, 41:357-366, 2009.
- WILHELM, W. W.; JOHNSON, J. M. F.; HATFIELD, J. L., VOORHEES, W. B.; LINDEN, D. R. Crop and soil productivity response to corn residue removal: a literature review. *Agronomy Journal*, 96:1– 17, 2004.
- ZINN, Y. L. Textural, mineralogical and structural controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrados. Ohio State University, Ohio, 196p, 2005.
- ZINN, Y. L.; LAL, R. & RESCK, D. V. S. Texture and organic carbon relation described by a profile pedotransfer function in Brazilian Cerrado soils. *Geoderma* 127:168–173, 2005.
- ZINN, Y. L.; LAL, R.; BIGHAM, J. M. & RESCK, D. V. S. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: texture and mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 71:1204-1214, 2007.

Quadro 1. Características físicas de amostras de camadas em profundidade de Latossolos sob vegetação nativa coletados em localidades distintas

Local	Prof. (cm)	Areia	Areia	Areia	Silte	Argila	Classificação Textural
		Grossa	Fina	Total			
		----- % -----					
Luís Antônio	0-10	2	8	10	18	72	Muito Argiloso
Luís Antônio	10-20	2	8	10	18	72	Muito Argiloso
Luís Antônio	20-40	2	8	9	18	73	Muito Argiloso
Luís Antônio	40-60	2	8	10	16	74	Muito Argiloso
Luís Antônio	60-100	2	7	9	17	74	Muito Argiloso
Curvelo	0-10	4	5	9	5	86	Muito Argiloso
Curvelo	10-20	3	4	7	4	89	Muito Argiloso
Curvelo	20-40	4	4	8	7	85	Muito Argiloso
Curvelo	40-60	4	4	8	8	84	Muito Argiloso
Curvelo	60-100	4	4	8	7	85	Muito Argiloso
Belo Oriente	0-10	26	11	37	5	58	Argila
Belo Oriente	10-20	19	12	31	5	64	Muito Argiloso
Belo Oriente	20-40	17	11	28	4	68	Muito Argiloso
Belo Oriente	40-60	11	14	25	4	70	Muito Argiloso
Belo Oriente	60-100	11	13	24	6	70	Muito Argiloso
Bom Despacho	0-10	0	1	2	12	86	Muito Argiloso
Bom Despacho	10-20	1	2	3	12	85	Muito Argiloso
Bom Despacho	20-40	0	2	2	13	85	Muito Argiloso
Bom Despacho	40-60	0	2	2	12	86	Muito Argiloso
Bom Despacho	60-100	0	1	1	15	83	Muito Argiloso
Virginópolis	0-10	22	7	29	4	67	Muito Argiloso
Virginópolis	10-20	22	7	30	3	67	Muito Argiloso
Virginópolis	20-40	18	7	25	2	73	Muito Argiloso
Virginópolis	40-60	11	11	22	7	72	Muito Argiloso
Virginópolis	60-100	21	8	29	6	65	Muito Argiloso

Quadro 2. Teores de COT (g kg^{-1}) e déficit's de saturação de C (DSC) (%) em cinco solos de regiões distintas sem adição dos tratamentos com resíduo

Profundidade (cm)	Luís Antônio		Curvelo		Belo Oriente		Bom Despacho		Virginópolis	
	COT (g/kg)	DSC (%)	COT (g/kg)	DSC (%)	COT (g/kg)	DSC (%)	COT (g/kg)	DSC (%)	COT (g/kg)	DSC (%)
0 - 10	28,18	0,00	18,11	0,00	17,70	0,00	22,76	0,00	52,60	0,00
10 - 20	19,10	32,23	15,15	16,39	14,33	19,04	18,27	19,73	37,35	28,99
20 - 40	16,61	41,07	12,72	29,77	10,68	39,66	16,37	28,09	28,00	46,76
40 - 60	12,43	55,89	10,43	42,41	8,21	53,60	13,29	41,59	25,27	51,95
60 - 100	9,87	64,98	9,73	46,31	7,07	60,08	10,24	55,01	18,60	64,63

Quadro 3. Características químicas de camadas em profundidade de Latossolos sob vegetação nativa coletados em localidades distintas

Local	Prof. (cm)	pH (H ₂ O)	Ca	Mg	Al	SB	t	m	P	K	Na	Zn	Cu	Fe	Mn	B	S- SO ₄ ²⁻	Prem
Luís Antônio	0-10	4,65	0,57	1,14	1,00	1,96	2,96	34	3	93	3	0,85	3,14	37	178,8	0,40	1,3	15,2
Luís Antônio	10-20	4,67	0,30	0,51	1,87	0,97	2,84	66	1	58	3	0,37	4,95	38	68,3	0,38	1,5	10,5
Luís Antônio	20-40	4,94	0,33	0,48	1,50	0,98	2,48	60	1	61	4	0,26	4,43	30	59,0	0,36	1,3	8,8
Luís Antônio	40-60	4,68	0,15	0,19	1,30	0,40	1,70	76	1	22	1	0,18	3,97	30	38,7	0,35	0,0	6,8
Luís Antônio	60-100	4,88	0,09	0,09	1,01	0,21	1,22	83	1	12	1	0,14	3,76	27	24,4	0,26	0,0	3,6
Curvelo	0-10	4,36	0,03	0,17	1,54	0,32	1,86	83	1	41	1	1,39	0,47	29	25,2	0,49	0,6	12,6
Curvelo	10-20	4,85	0,02	0,06	1,29	0,16	1,45	89	1	28	2	0,15	0,61	18	10,2	0,39	0,0	9,2
Curvelo	20-40	5,22	0,01	0,06	0,97	0,13	1,10	88	1	20	1	0,09	0,47	16	6,9	0,32	0,1	8,9
Curvelo	40-60	5,22	0,01	0,03	0,87	0,07	0,94	92	1	12	2	0,02	0,32	12	6,6	0,18	0,1	8,0
Curvelo	60-100	5,24	0,01	0,02	0,64	0,04	0,68	94	1	7	1	0,02	0,29	13	5,2	0,04	0,0	5,8
Belo Oriente	0-10	4,25	0,23	0,33	1,54	0,64	2,18	71	2	29	1	1,21	0,12	84	10,2	0,58	1,8	25,4
Belo Oriente	10-20	4,23	0,10	0,12	1,71	0,29	2,00	85	3	26	1	1,68	0,13	184	7,5	0,76	2,7	23,8
Belo Oriente	20-40	4,26	0,04	0,07	1,51	0,15	1,66	91	1	16	0	0,57	0,09	80	3,1	0,57	2,8	22,2
Belo Oriente	40-60	4,29	0,01	0,01	1,40	0,03	1,44	98	1	5	0	0,58	0,07	34	1,4	0,44	11,8	20,8
Belo Oriente	60-100	4,35	0,01	0,01	1,18	0,02	1,20	98	1	2	0	1,39	0,10	12	0,5	0,27	21,2	17,1
Bom Despacho	0-10	4,83	0,06	0,19	1,63	0,42	2,04	80	1	61	3	0,21	0,50	35	6,1	0,73	1,3	15,9
Bom Despacho	10-20	4,75	0,02	0,06	1,50	0,18	1,68	89	1	35	3	0,16	0,54	34	3,6	0,68	0,0	13,1
Bom Despacho	20-40	4,84	0,03	0,04	1,38	0,13	1,50	92	1	25	0	0,26	0,54	30	3,2	0,36	0,0	10,2
Bom Despacho	40-60	4,85	0,01	0,01	1,01	0,05	1,06	95	1	13	0	0,00	0,38	21	3,2	0,30	0,0	7,7
Bom Despacho	60-100	5,03	0,01	0,01	0,55	0,03	0,58	95	1	8	0	0,00	0,26	13	2,5	0,28	0,0	6,2
Virginópolis	0-10	4,08	0,10	0,16	2,19	0,45	2,64	83	4	65	4	0,64	0,00	194	3,0	0,94	5,3	10,4
Virginópolis	10-20	4,46	0,07	0,12	1,44	0,33	1,76	81	2	46	3	0,30	0,00	96	3,1	0,83	5,4	10,1
Virginópolis	20-40	4,52	0,06	0,07	1,11	0,21	1,31	84	2	27	2	0,20	0,00	69	2,2	0,57	4,2	7,8
Virginópolis	40-60	4,82	0,04	0,03	0,53	0,11	0,64	83	1	14	2	0,12	0,00	48	1,3	0,54	5,1	6,9
Virginópolis	60-100	4,66	0,03	0,03	0,47	0,09	0,56	84	1	12	1	0,10	0,00	42	0,9	0,40	6,2	7,4

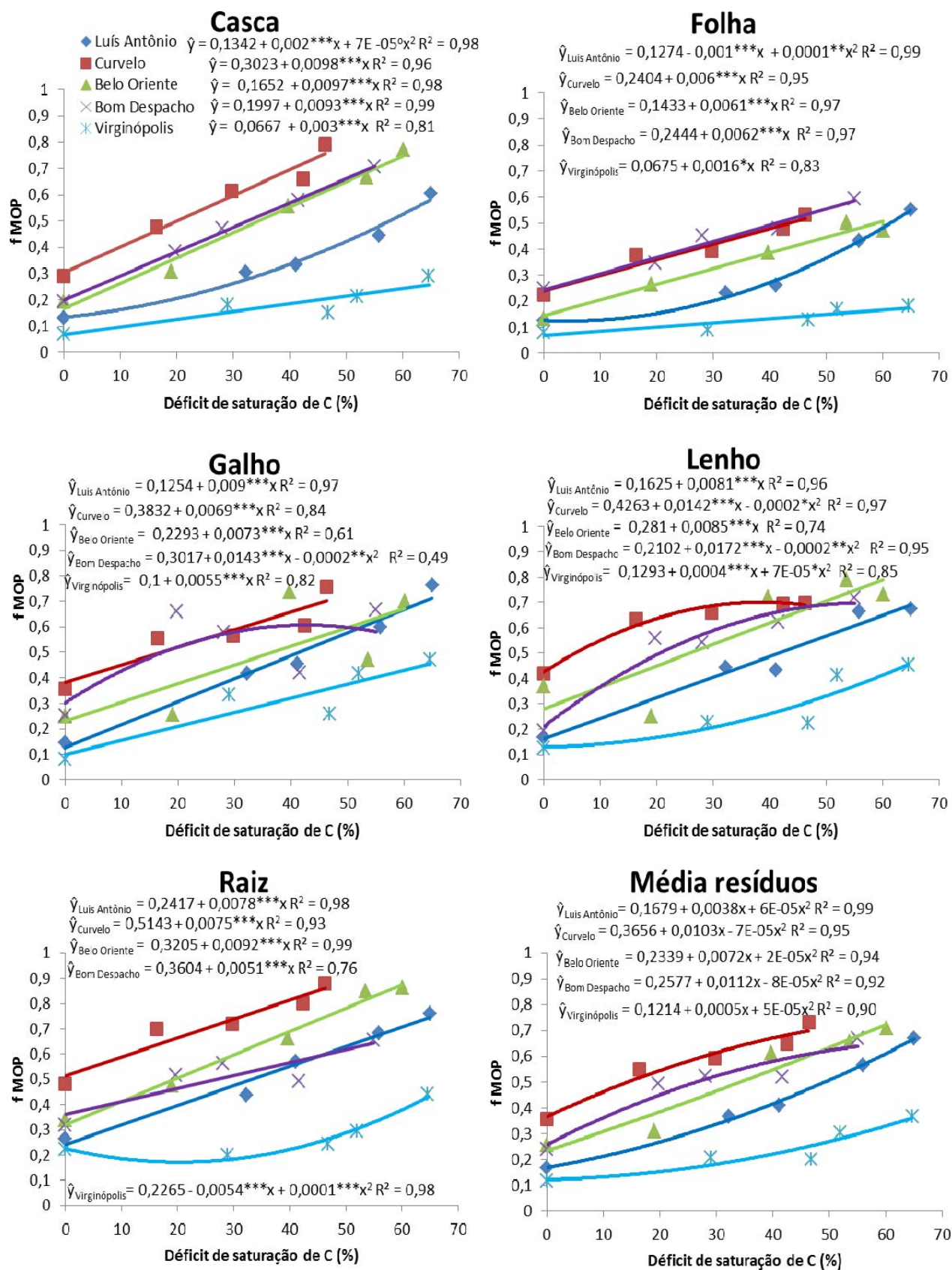


Figura 1. Proporção do C do resíduo adicionado na fração matéria orgânica particulada (MOP) de acordo com o déficit de saturação de C em cinco solos de regiões distintas em cada tipo de resíduo.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

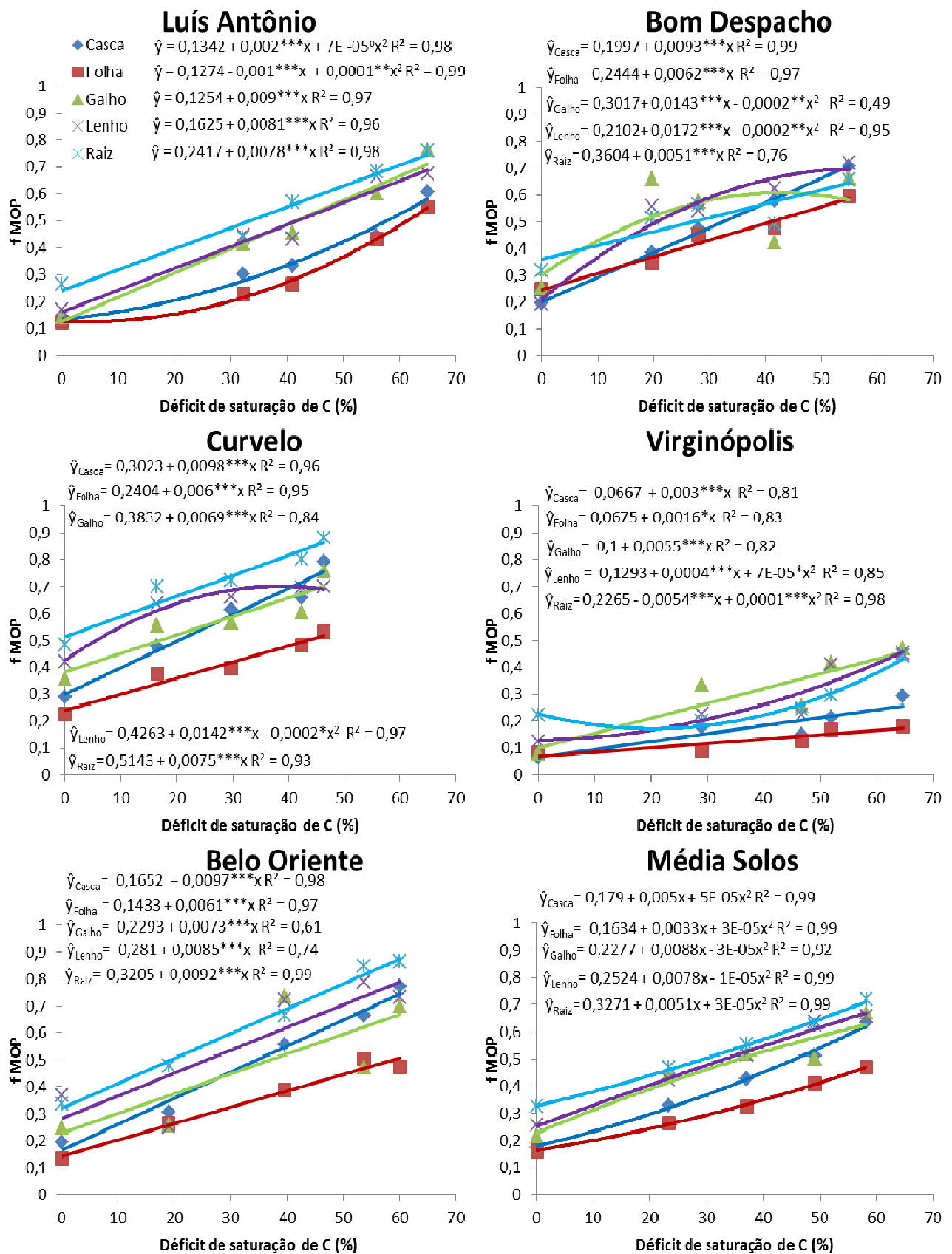


Figura 2. Proporção do C do resíduo adicionado na fração matéria orgânica particulada (MOP) de acordo com o déficit de saturação de C e do tipo de resíduo adicionado em cinco solos de regiões distintas.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

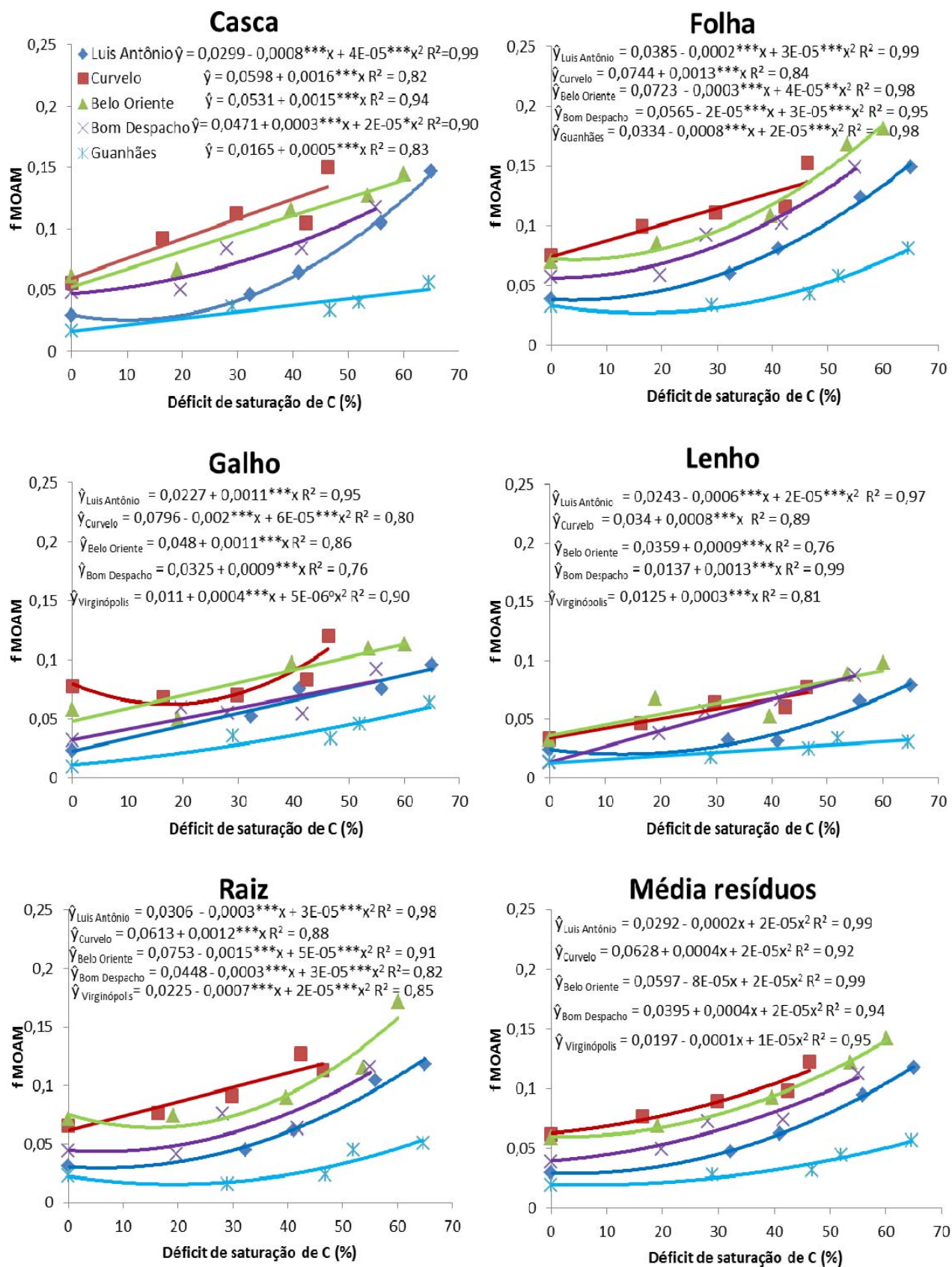


Figura 3. Proporção do C do resíduo adicionado na fração matéria orgânica associada à fração mineral (MOAM) de acordo com o déficit de saturação de C em cinco solos de regiões distintas em cada tipo de resíduo.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

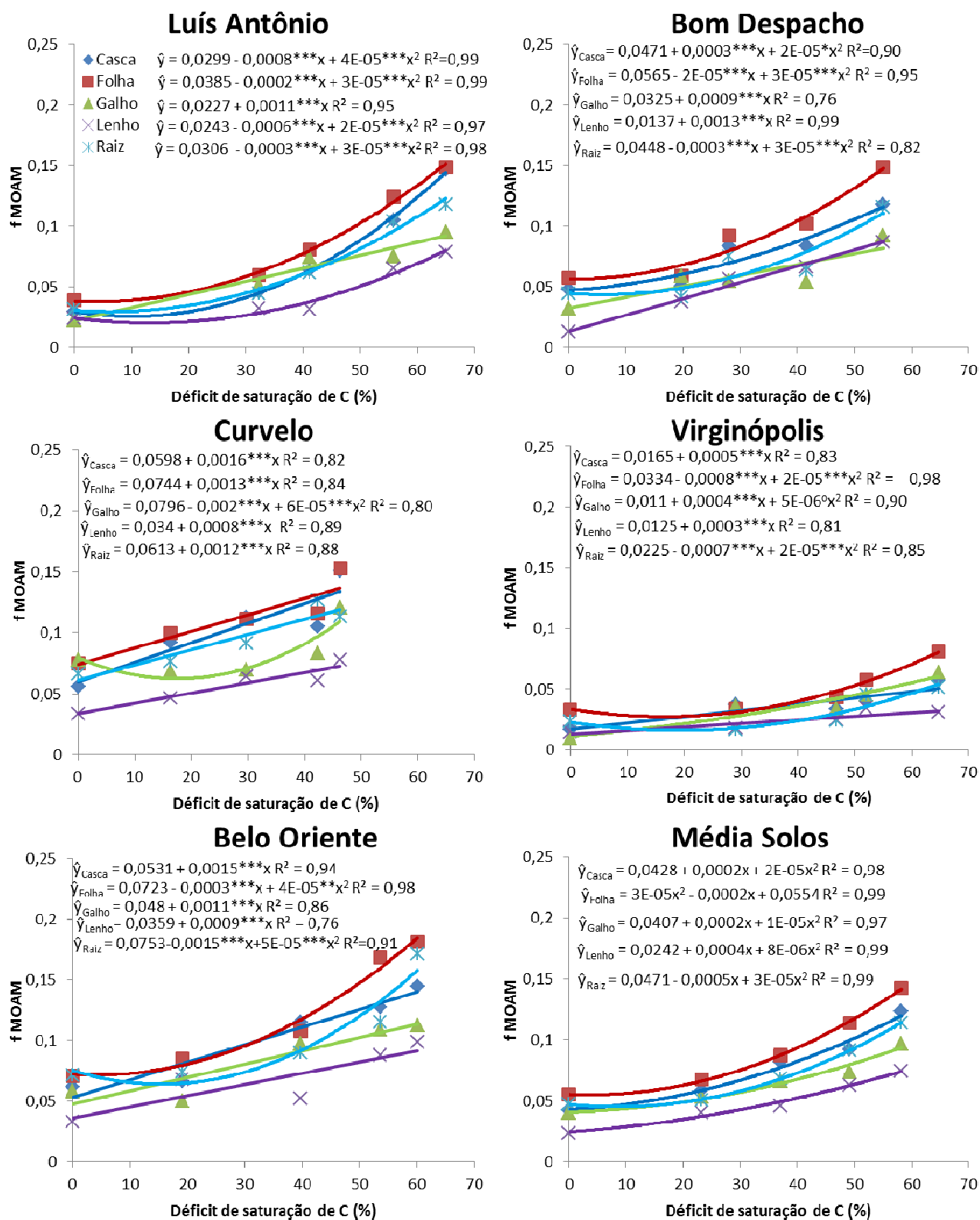


Figura 4. Proporção do C do resíduo adicionado na fração matéria orgânica associada à fração mineral (MOAM) de acordo com o déficit de saturação de C e do tipo de resíduo adicionado em cinco solos de regiões distintas.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

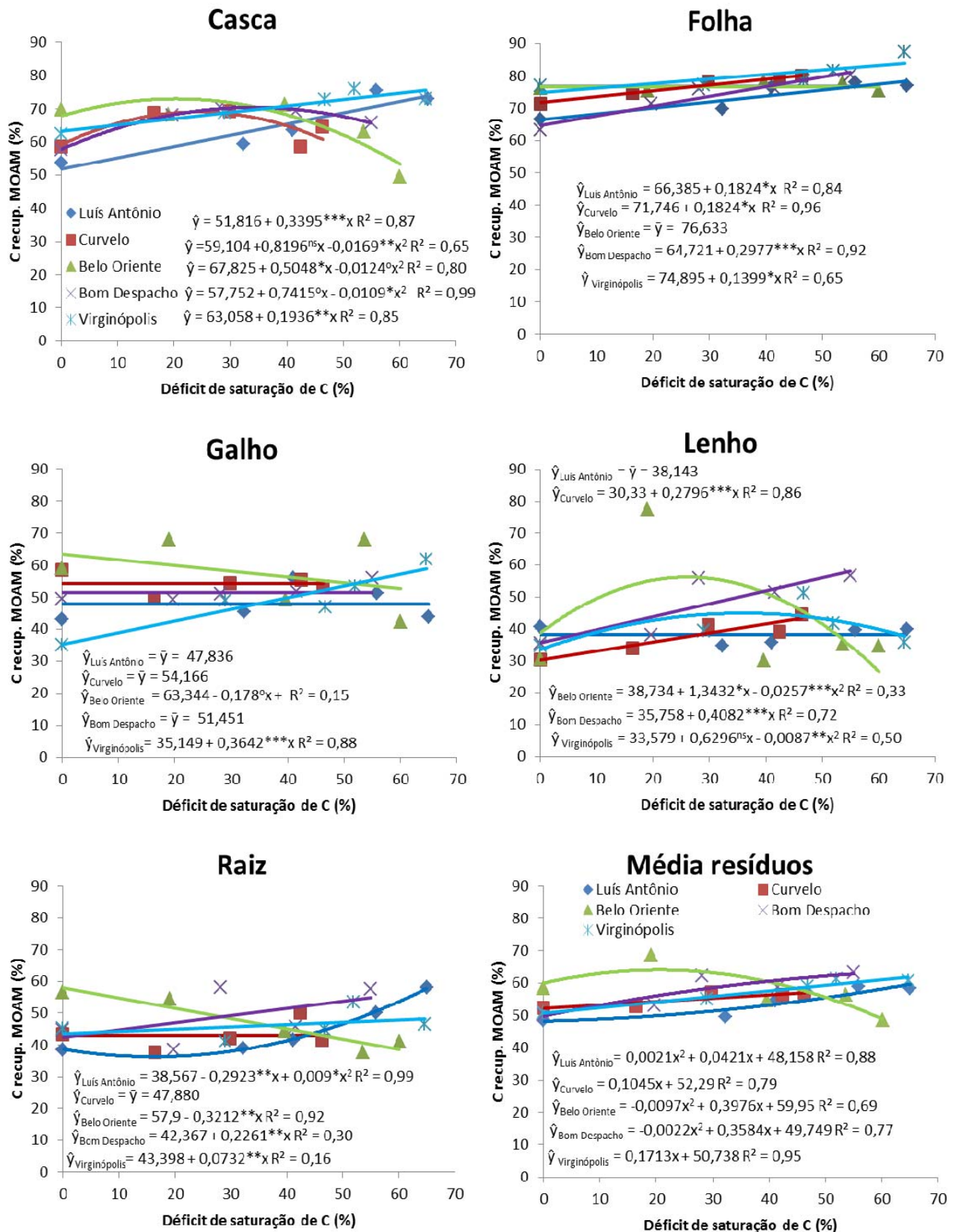


Figura 5. Taxa de recuperação do C do resíduo adicionado na fração matéria orgânica associada à fração matéria mineral (MOAM) em relação ao recuperado na MOP + MOAM de acordo com o déficit de saturação de C em cinco solos de regiões distintas em cada tipo de resíduo.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade e ^{ns}: não significativo, respectivamente, pelo teste F.

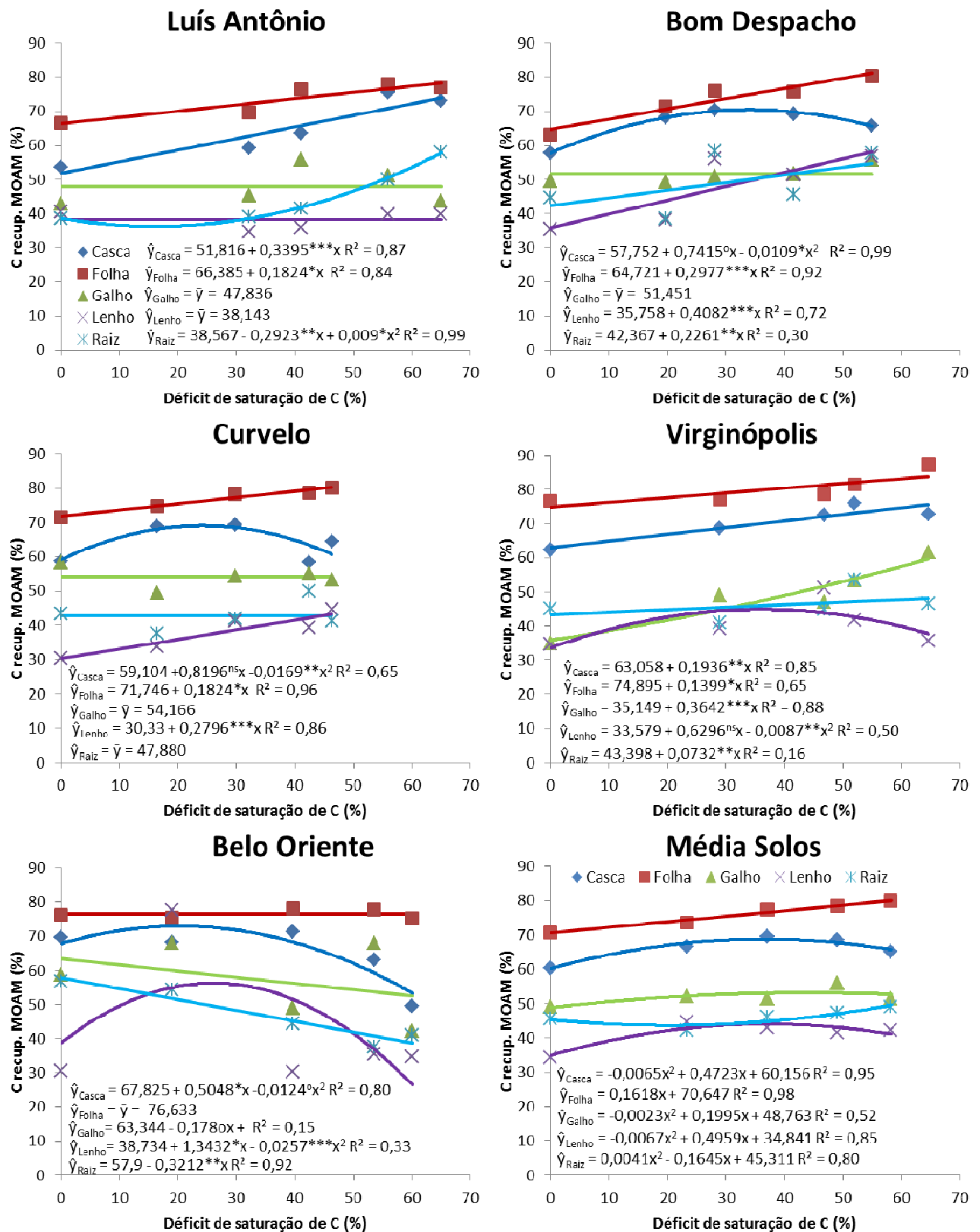
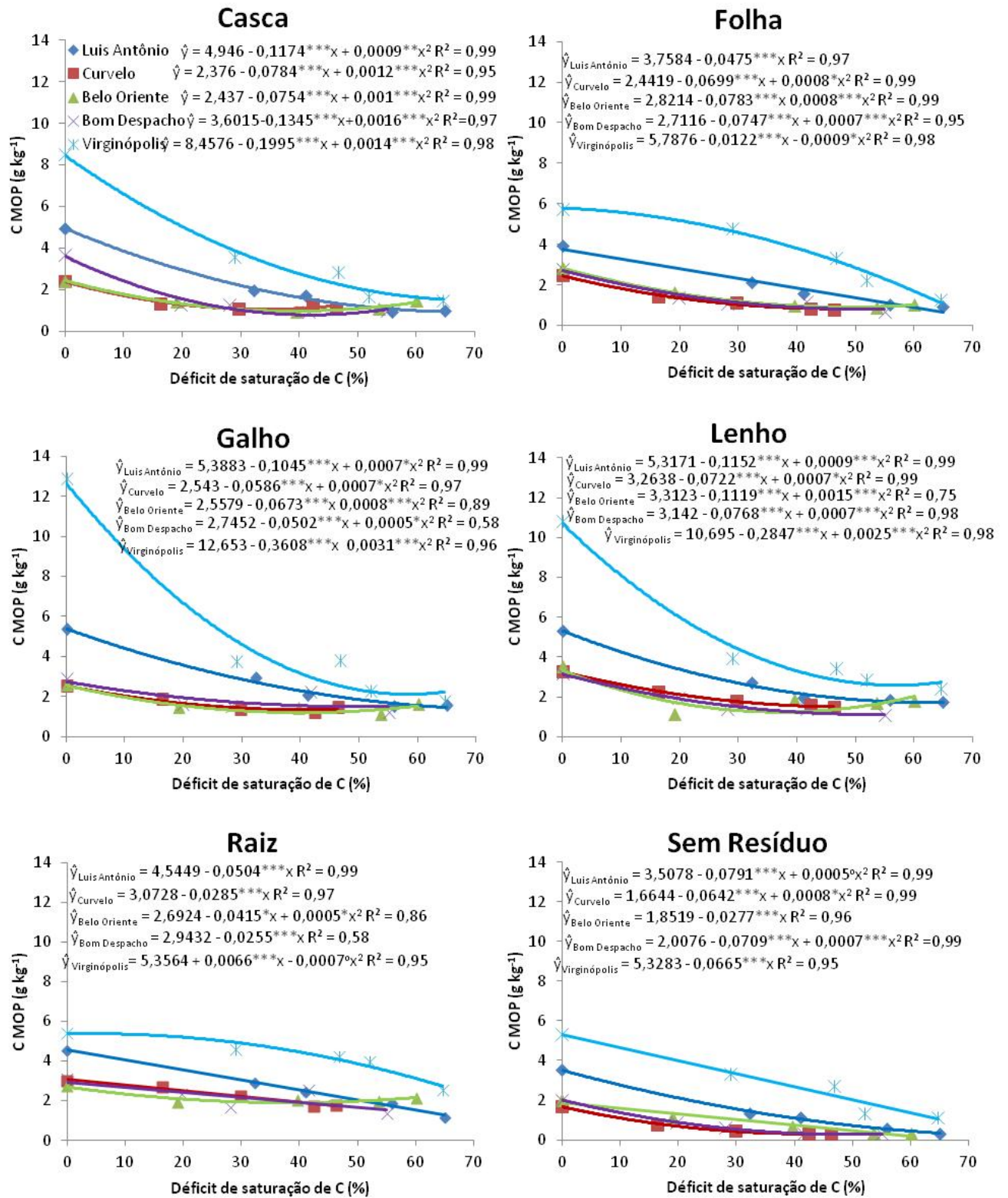
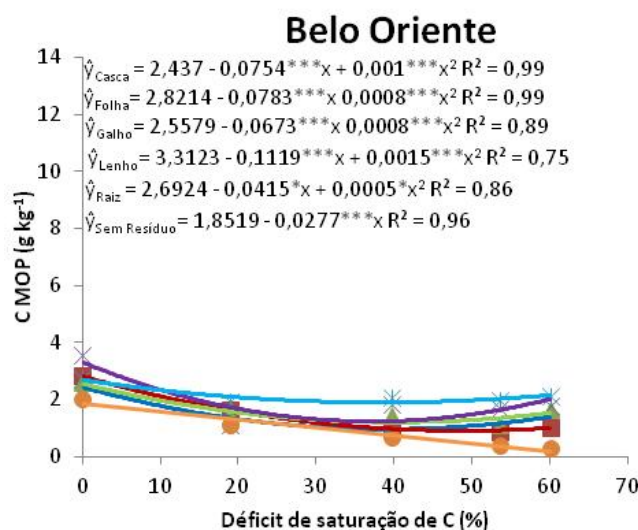
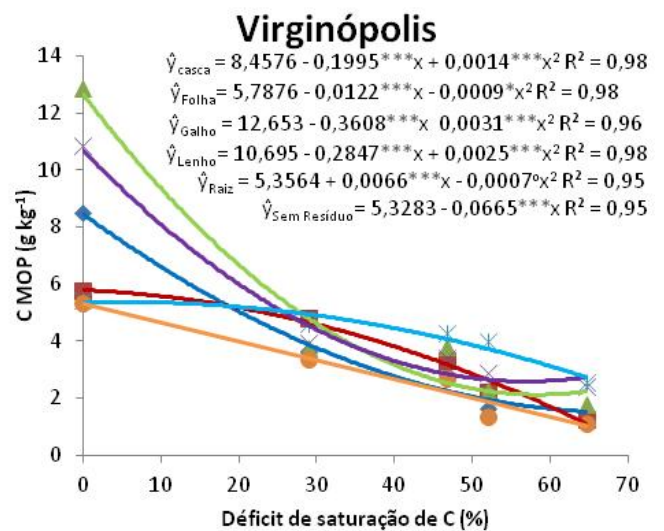
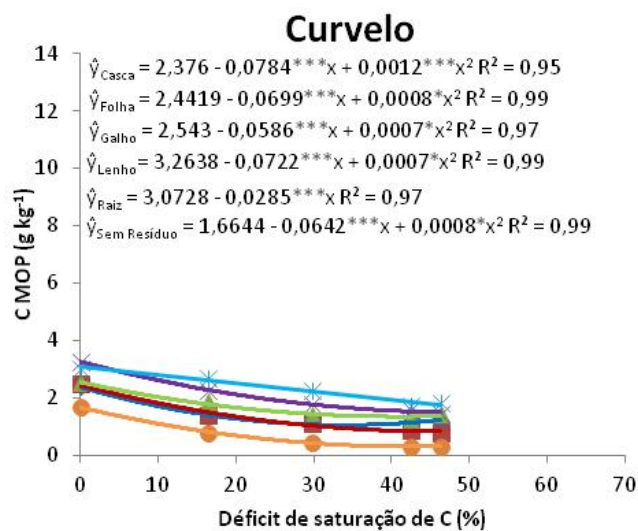
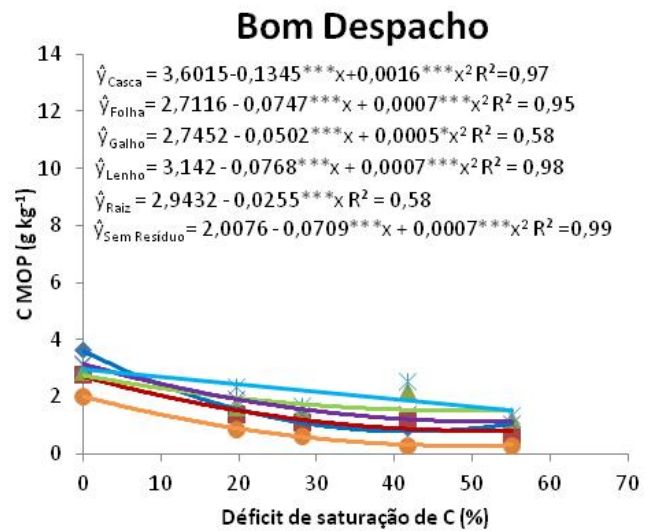
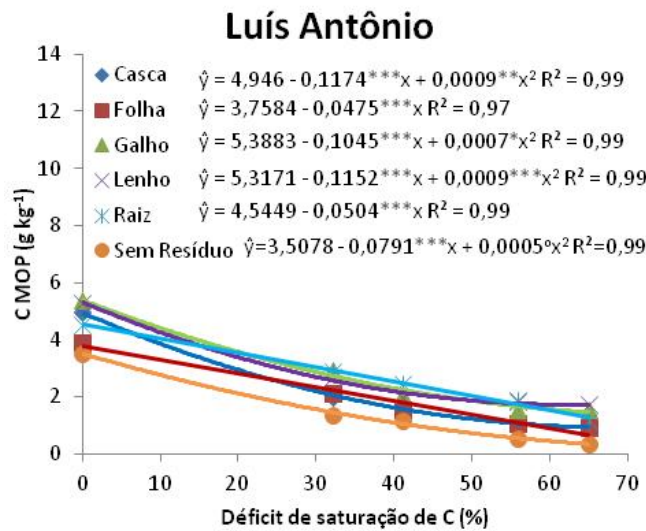


Figura 6. Taxa de recuperação do C do resíduo adicionado na fração matéria orgânica associada à fração mineral (MOAM) em relação ao recuperado na MOP + MOAM de acordo com o déficit de saturação de C e do tipo de resíduo adicionado em cinco solos de regiões distintas.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, e ^{ns}: não significativo, respectivamente, pelo teste F.

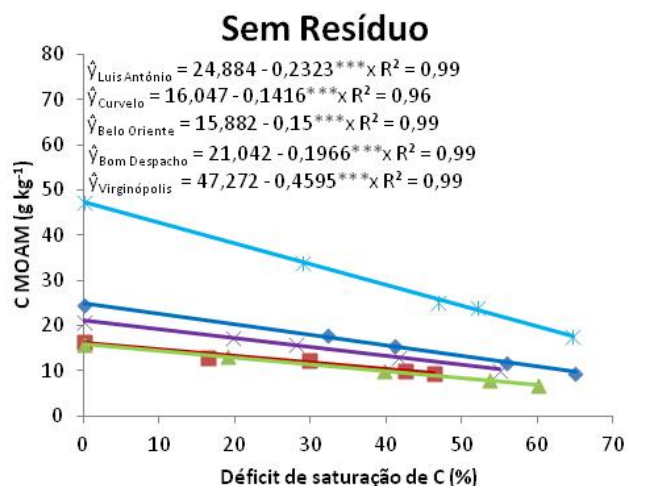
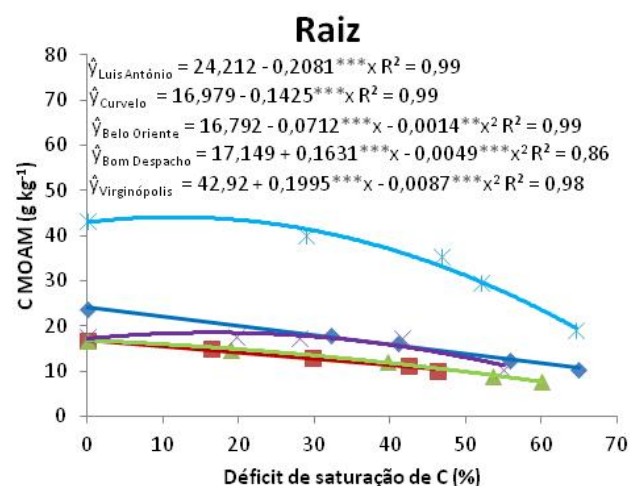
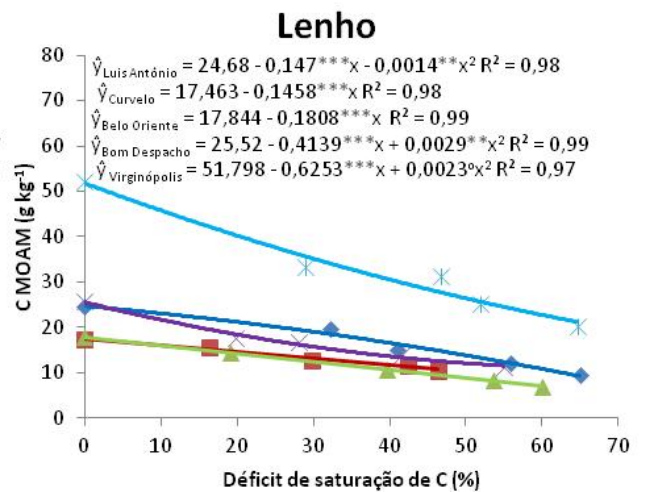
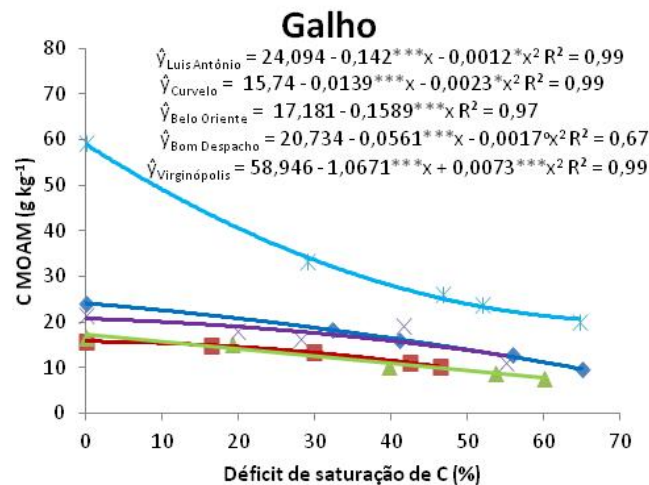
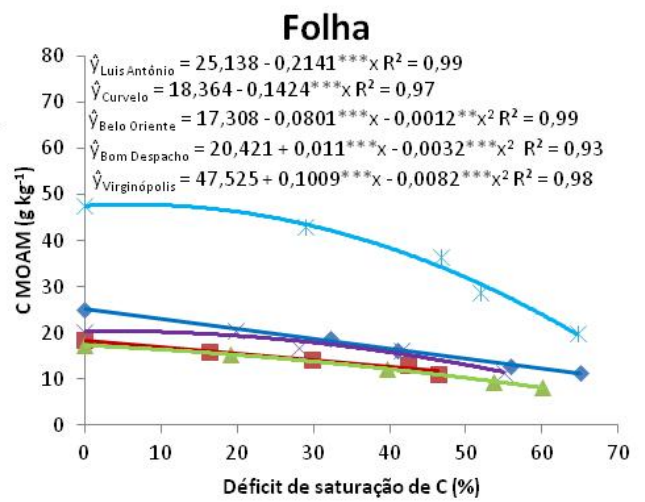
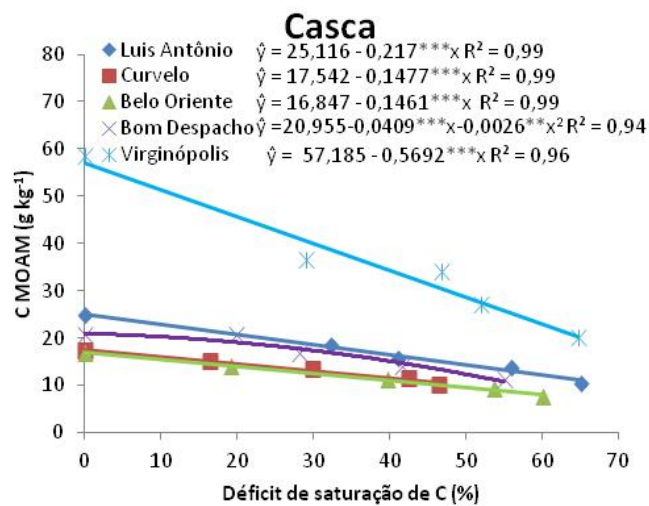
ANEXOS



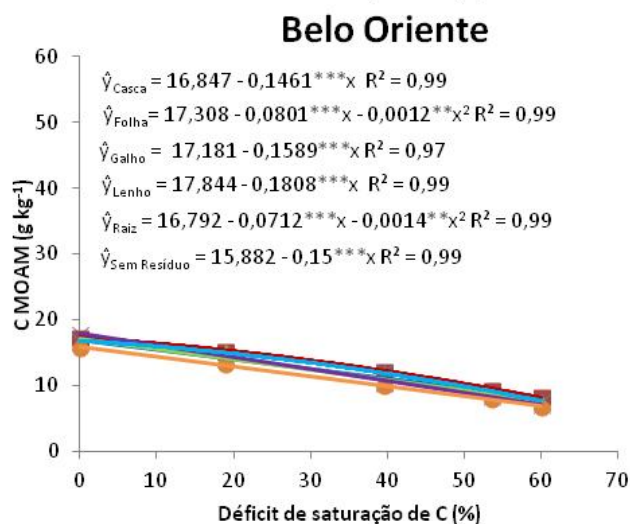
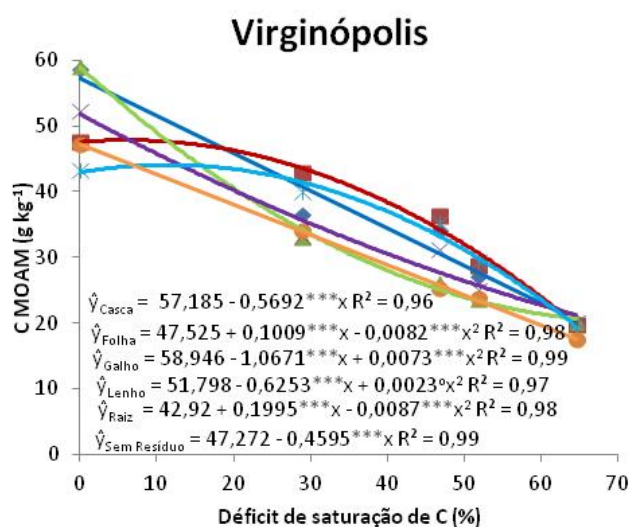
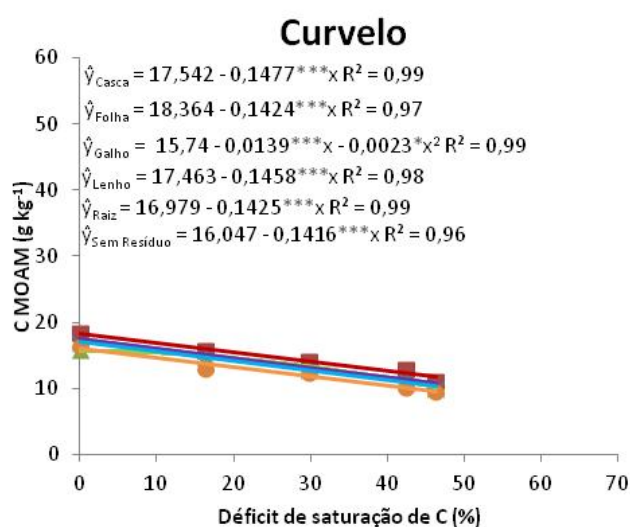
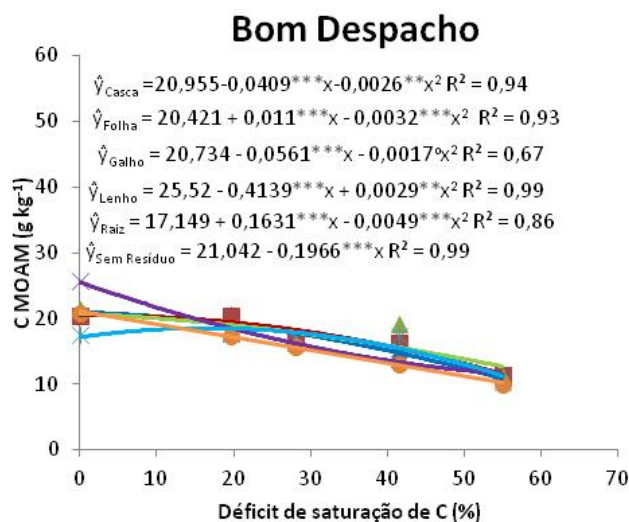
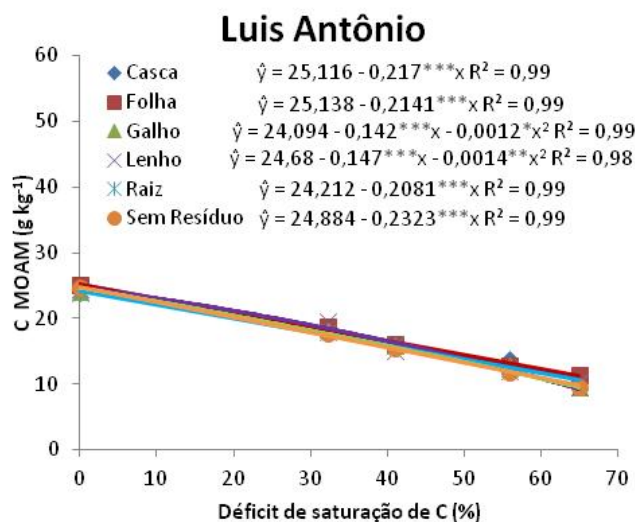
Anexo 1. Conteúdo de C (g kg^{-1} de solo) na fração matéria orgânica particulada (MOP) de acordo com o déficit de saturação de C em cinco solos de regiões distintas em cada tipo de resíduo. ***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.



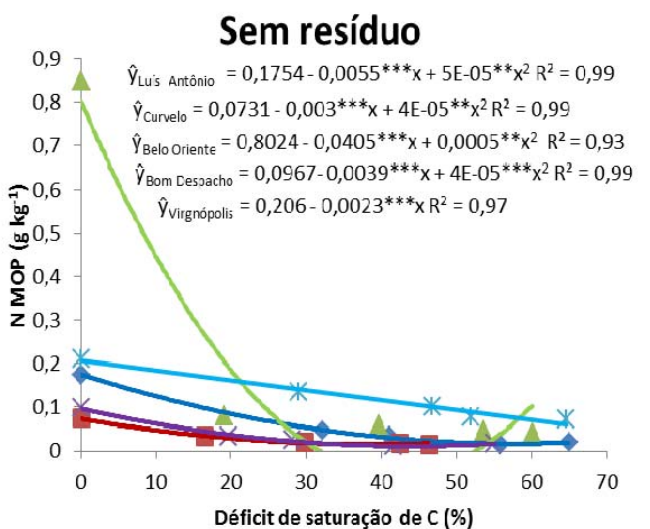
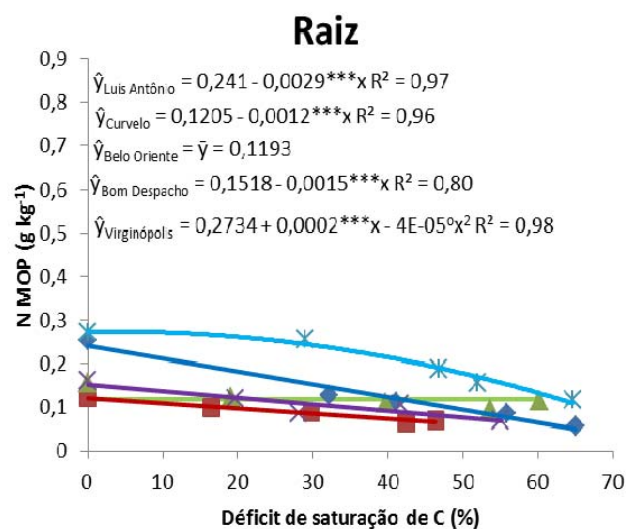
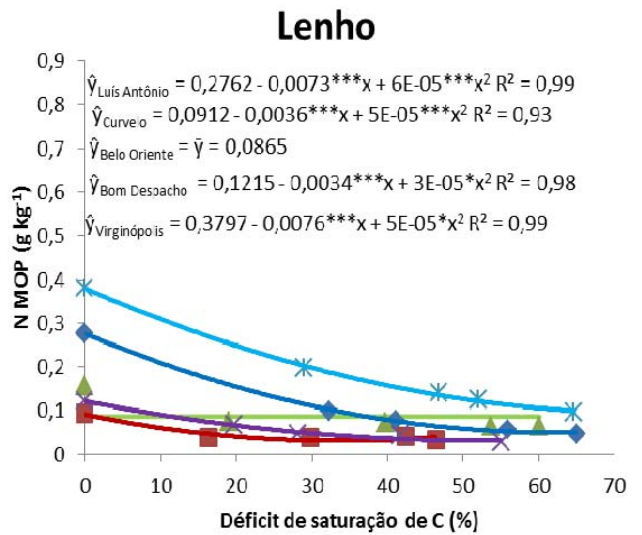
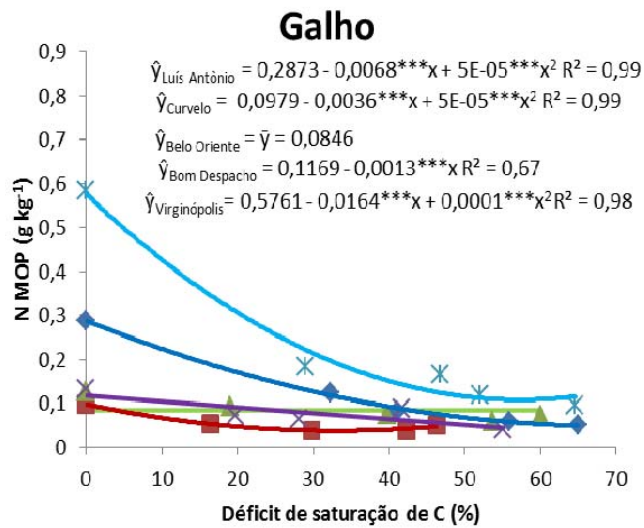
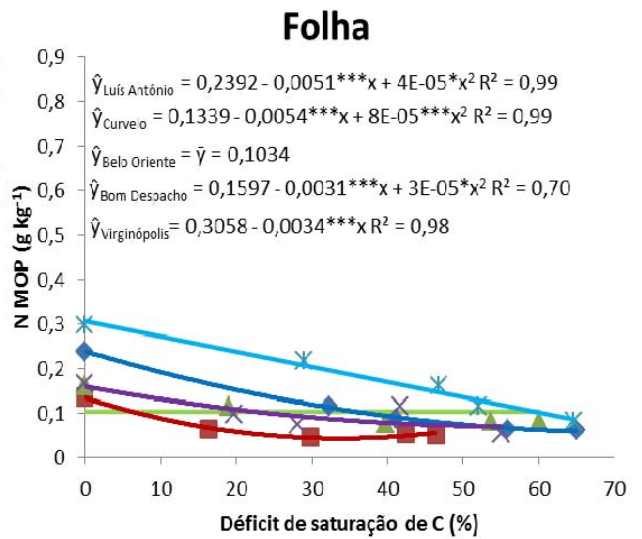
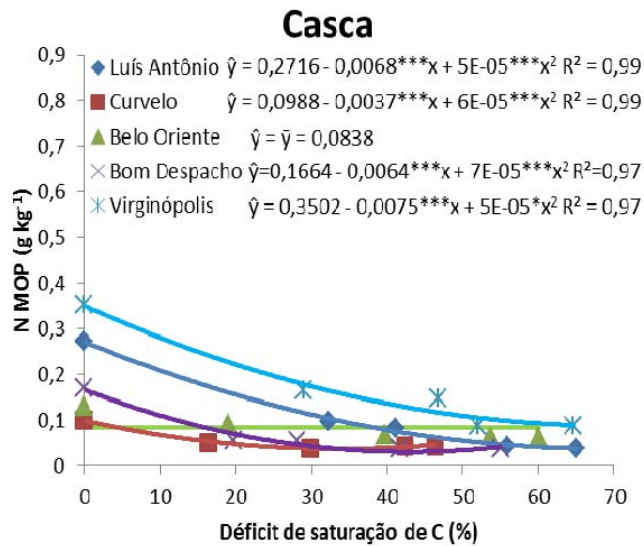
Anexo 2. Conteúdo de C ($g\ kg^{-1}$ de solo) na fração matéria orgânica particulada (MOP) de acordo com o déficit de saturação de C e do tipo de resíduo adicionado em cinco solos de regiões distintas. ***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.



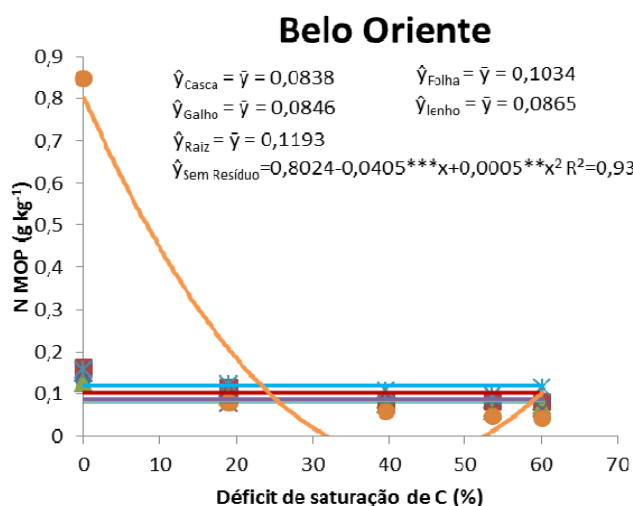
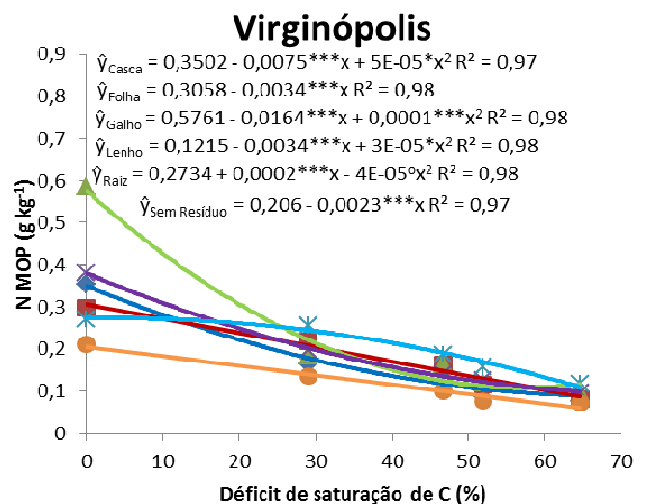
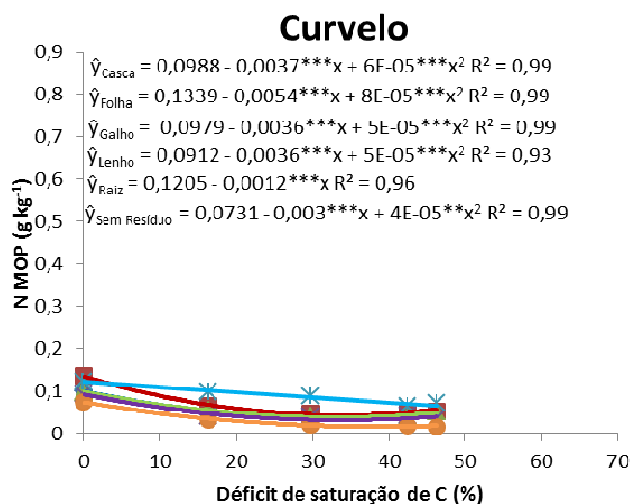
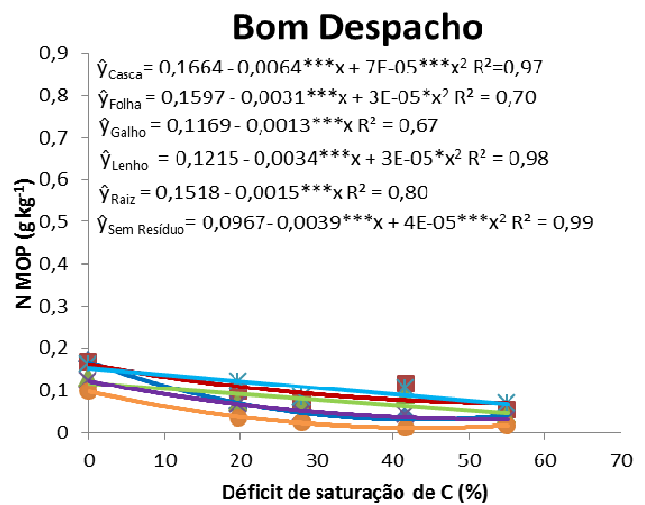
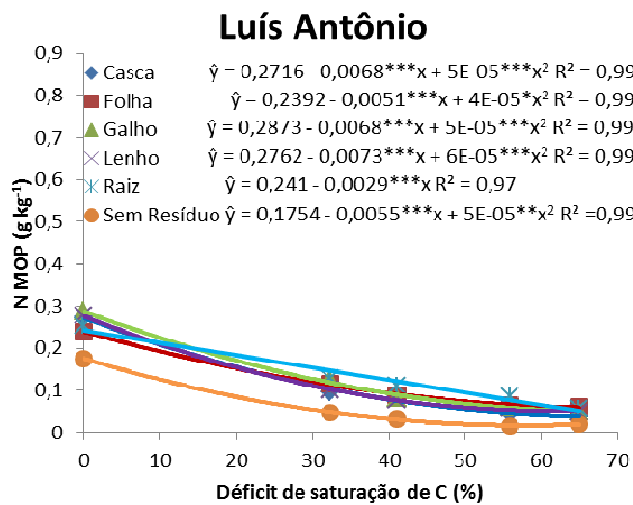
Anexo 3. Conteúdo de C (g kg^{-1} de solo) na fração matéria orgânica associada à fração mineral do solo (MOAM) de acordo com o déficit de saturação de C em cinco solos de regiões distintas em cada tipo de resíduo.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.



Anexo 4. Conteúdo de C ($g\ kg^{-1}$ de solo) na fração matéria orgânica associada à fração mineral do solo (MOAM) de acordo com o déficit de saturação de C e do tipo de resíduo adicionado em cinco solos de regiões distintas.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.



Anexo 5. Conteúdo de N (g kg^{-1} de solo) na fração matéria orgânica particulada (MOP) de acordo com o déficit de saturação de C em cinco solos de regiões distintas em cada tipo de resíduo. ***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.



Anexo 6. Conteúdo de N ($g\ kg^{-1}$ de solo) na fração matéria orgânica associada a fração mineral (MOAM) de acordo com o déficit de saturação de C em cinco solos de regiões distintas em cada tipo de resíduo.***, **, *, °: significativo a 0,1, 1, 5, 10 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Anexo 7. Composição isotópica das partes das plantas de eucalipto utilizadas enriquecidas com ^{13}C por Machado (2009)

Parte da planta	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$
	‰
Folha-dreno	828,1 a
Casca	691,7 a
Galho	672,5 a
Folha-fonte	645,7 a
Lenho	636,0 a
Raiz	536,6 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

Anexo 8. Análise de variância das frações da matéria orgânica de acordo com o déficit de saturação de C em cinco solos de regiões distintas em cada tipo de resíduo

F.V.	G.L.	Quadrado Médio					
		CMOAM	CMOP	COT	NMOAM	NMOP	NT
Luis Antônio							
Bloco	2	1,07	0,1608	1,78	0,0222	0,000446	0,0272
Déficit Saturação C	4	561,04***	35,5822***	869,28***	3,5131***	0,126128***	4,9041***
TipoResíduo	5	2,11*	4,227***	6***	0,0248	0,009147***	0,0354 ^o
DSC*TipoResíduo	20	0,85	0,2199	1,03	0,0094	0,00071	0,0104
Resíduo	58	0,75	0,2082	0,78	0,0169	0,000612	0,0168
Curvelo							
Bloco	2	0,82	0,0262	0,9	0,0033	0,000031	0,0035
Déficit Saturação C	4	130,58***	6,2316***	190,4***	0,3773***	0,012038***	0,5014***
TipoResíduo	5	8,57***	4,8851***	16,8***	0,0454***	0,00559***	0,0712***
DSC*TipoResíduo	20	0,56	0,0864	0,74	0,0088	0,000212	0,0094
Resíduo	58	0,65	0,0701	0,78	0,0055	0,000134	0,0058
Belo Oriente							
Bloco	2	0,31	0,0394	0,14	0,00187	0,052606	0,0737
Déficit Saturação C	4	276,31***	6,7426***	350,25***	1,9262***	0,124845 ^o	2,7683***
TipoResíduo	5	5,23***	3,0393***	12,73***	0,0631***	0,038563	0,0744
DSC*TipoResíduo	20	0,75*	0,2947***	1,14**	0,0194**	0,053364	0,0751
Resíduo	58	0,35	0,0831	0,49	0,00798	0,05423	0,0611
Bom Despacho							
Bloco	2	0,04	0,0418	0,16	0,0298	0,000036	0,0284
Déficit Saturação C	4	258,95***	10,6863***	358,9***	1,1178***	0,026707***	1,393***
TipoResíduo	5	7,42***	3,3831***	15,58***	0,3474***	0,010428***	0,3976***
DSC*TipoResíduo	20	9,8***	0,3235***	11,55***	0,4182***	0,000653**	0,4094***
Resíduo	58	1,25	0,0675	1,05	0,0191	0,000265	0,0198
Virginópolis							
Bloco	2	17,73 ^o	0,499	14,6 ^o	0,0558	0,002125	0,0736
Déficit Saturação C	4	2612,77***	112,123***	3783,9***	15,1812***	0,189435***	18,6652***
TipoResíduo	5	66,47***	9,635***	84,1***	0,3005***	0,020194***	0,3967***
DSC*TipoResíduo	20	49,8***	6,642***	86***	0,1665***	0,01032***	0,2409***
Resíduo	58	5,62	0,365	5,3	0,0332	0,001335	0,039

^o, *, **, ***: significativo a 10, 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Anexo 9. Análise de variância das variáveis de recuperação de C do resíduo nas frações da matéria orgânica de acordo com o déficit de saturação de C em cinco solos de regiões distintas em cada tipo de resíduo

F.V.	G.L.	Quadrado Médio				
		f MOAM	f MOP	C recup. MOAM	C recup. MOP	C recup MOAM relat.
Luis Antônio						
Bloco	2	0,000011	0,00447	1,15	0,01	2,7
DSC	4	0,019178***	0,56236***	286,87***	24,33	346,3***
TipoRes	4	0,004072***	0,12431***	391,26***	613,85***	3234,8***
DSC*TipoResíduo	16	0,000513***	0,00567	33,84***	29,32	77,2
Resíduo	48	0,000052	0,00525	5,37	19,45	56,5
Curvelo						
Bloco	2	0,000173	0,00518	1,53	0,85	4
DSC	4	0,007999***	0,2972***	42,08***	36,1*	75,4*
TipoRes	4	0,00672***	0,19747***	563,32***	1122,01***	3714,2***
DSC*TipoResíduo	16	0,000501***	0,00539	24,5***	22,31*	59**
Resíduo	48	0,000105	0,00535	4,23	11,15	20,7
Belo Oriente						
Bloco	2	0,000702	0,01949	29,41	43,83 ^o	101,4
DSC	4	0,018334***	0,65504***	12,61	406,48***	809,2***
TipoRes	4	0,006513***	0,17294***	395,67***	823,39***	2910,5***
DSC*TipoResíduo	16	0,000763*	0,02347*	25,19*	73,05***	314,9***
Resíduo	48	0,000324	0,01182	12,92	16,56	72,2
Bom Despacho						
Bloco	2	0,00028 ^o	0,00784	29,83*	9,35	64,1
DSC	4	0,011986***	0,35951***	232,14***	30,28 ^o	499***
TipoRes	4	0,003671***	0,02737**	396,26***	275,82***	2012,4***
DSC*TipoResíduo	16	0,000303***	0,01668***	17,66*	22,08 ^o	64,5*
Resíduo	48	0,000095	0,00505	7,98	12,45	28,8
Virginópolis						
Bloco	2	0,000055 ^o	0,006021	38,19**	17,39	48,9
DSC	4	0,003258***	0,143151***	54,18***	38,02*	291***
TipoRes	4	0,001302***	0,092794***	598,27***	710,52***	4403***
DSC*TipoResíduo	16	0,000171***	0,009585***	41,03***	22,34 ^o	81,4**
Resíduo	48	0,000021	0,002837	4,88	12,44	27,9

^o, *, **, ***: significativo a 10, 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.