



**RICARDO CARDOSO FIALHO**

**CARBONO, FÍSICA E QUÍMICA DE SOLOS  
SOB REFLORESTAMENTO EM CLIMA  
TROPICAL DE ALTITUDE**

**LAVRAS – MG**

**2012**

**RICARDO CARDOSO FIALHO**

**CARBONO, FÍSICA E QUÍMICA DE SOLOS SOB  
REFLORESTAMENTO EM CLIMA TROPICAL DE ALTITUDE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de plantas, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Yuri Lopes Zinn

**LAVRAS – MG**

**2012**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Fialho, Ricardo Cardoso.

Carbono, física e química de solos sob reflorestamento em clima tropical de altitude / Ricardo Cardoso Fialho. – Lavras : UFLA, 2012.

86 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Yuri Lopes Zinn.

Bibliografia.

1. *Araucaria angustifolia*. 2. *Pinus patula*. 3. *Cunninghamia lanceolata*. 4. *Eucalyptus maidenni*. 5. Matéria orgânica do solo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.41

**RICARDO CARDOSO FIALHO**

**CARBONO, FÍSICA E QUÍMICA DE SOLOS SOB  
REFLORESTAMENTO EM CLIMA TROPICAL DE ALTITUDE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de plantas, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 17 de fevereiro de 2012.

Dr. Carlos Alberto Silva                      UFLA

Dra. Emanuelle Mercês Barros Soares   UFV

---

Dr. Yuri Lopes Zinn  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2012**

A Deus,  
aos meus pais, José Maria e Lucí,  
a minha namorada, Marcell,  
aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos,  
com carinho dedico.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade concedida, estrutura fornecida e pelo apoio financeiro.

Ao professor Yuri Lopes Zinn, pela orientação segura, incentivo, ensinamentos e, sobretudo, pela compreensão e amizade.

Aos professores Carlos Alberto Silva e Emanuelle Mercês Barros Soares, pelas sugestões, críticas, esclarecimentos e amizade.

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

A Melhoramentos Florestal S.A., em especial a Leandro Pabis, pela disponibilização da área experimental, alojamento e dados cedidos gentilmente.

Aos funcionários do DCS/UFLA em especial a Dulce, Pezão, Doroteo, Cristina, Humberto, Gilson, Lú, Roberto, Emerson, Dirce, Antônio, dentre os demais, pela amizade, convívio e auxílio na concretização deste trabalho.

Aos companheiros Adriano Guerra, Alessandro, Marla, Franciane e Lauana de forma especial pela ajuda com as amostragens de campo, análises, aprendizado, convívio e amizade.

Aos amigos de departamento sem exceções pela recepção, amizade e companheirismo.

Aos verdadeiros amigos e companheiros de república Róberson e Tiago, pela sincera amizade e convívio diário.

Aos grandes amigos Alessandro, Douglas, Dobereiner, Poliana, Felipe, pela amizade, companheirismo e presença sempre que necessário.

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

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

Aos meus familiares pelo apoio, carinho e torcida sempre.

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

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

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

**Ayrton Senna**

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

**Martin L. King**

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

**Leonardo da Vinci.**

## **AUTOBIOGRAFIA**

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

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

No mês de março deste mesmo ano iniciou o curso de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, na área de concentração Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, onde publicou o artigo titulado como “Changes in soil organic carbon under Eucalyptus plantations in Brazil: a comparative analysis”. No mês de fevereiro de 2012 submeteu-se a defesa da dissertação.

## RESUMO

Atualmente, uma das preocupações mundiais está ligada ao aquecimento global e suas formas de mitigação. O Brasil está entre os países que mais emitem CO<sub>2</sub>, sendo que 75% desse gás advém da agropecuária. Os plantios florestais se destacam como estratégia para mitigação do aquecimento global, por meio do sequestro de carbono, na forma de madeira, biomassa e no solo. O solo se destaca como um dos principais reservatórios ativos de C da biosfera, porém sua dinâmica é complexa, sendo necessário o estudo mais aprofundado de manejos adequados para otimizar esse processo. O objetivo deste estudo é avaliar as mudanças em propriedades físicas, químicas e no teor e estoque de COS sob diferentes plantios de espécies florestais de ciclo médio em clima tropical de altitude no Sul de Minas Gerais. Foram selecionadas áreas em Camanducaia - MG, com altitudes de aproximadamente 1.350 metros, cultivadas com *Araucaria angustifolia*, *Cunninghamia lanceolata*, *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus maidennii* e *Pinus patula*, tendo uma Mata Ombrófila nativa como referência, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade. Foram realizadas análises físicas, químicas, mineralógica, micromorfológicas, e teor de COS e seu fracionamento. O delineamento amostral foi inteiramente casualizado com seis tratamentos, quatro profundidades e três repetições. O solo foi caracterizado como Argissolo Amarelo distrófico com classe textural argilo-arenosa, apresentando baixa fertilidade e alta acidez. Os teores dos nutrientes, com exceção do K, foram muito baixos, de modo que as florestas provavelmente suprem suas exigências nutricionais em camadas do solo abaixo das amostradas e pela ciclagem de nutrientes. Com relação às propriedades físicas do solo, o plantio das diferentes espécies não afetou a estabilidade dos agregados em água em relação à mata nativa, porém houve diminuição da Ds sob araucária e cunninghamia. As condições climáticas locais, favoráveis à produção florestal e à humificação, juntamente com a composição mineralógica, favoreceram o acúmulo de COS. Foram observados teores de COS na ordem de 103,7 g kg<sup>-1</sup> para camada de 0-5 cm do solo e estoque de 202,4 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 0-40 cm do solo sob cultivo de araucária, valores estes muito maiores do que os encontrados na maioria dos solos bem drenados do Brasil. Foram observados baixos teores de COS associado à fração areia, indicando que a maior parte do COS se encontra na forma humificada, o que sugere uma alta taxa de ciclagem do COS lábil nesse ambiente. O plantio de araucária resultou em acúmulo de COS de 50 Mg ha<sup>-1</sup> para a camada de 0-20 cm em relação à mata nativa, enquanto os plantios das demais espécies não diferem da testemunha.

Palavras-chave: Matéria orgânica do solo. *Araucaria angustifolia*. *Cunninghamia lanceolata*. *Eucalyptus maidennii*. *Pinus patula*.

## ABSTRACT

There is great concern today about global warming and its possible mitigative strategies. Brazil is among the world's largest CO<sub>2</sub> emitters, and ca. 75% of these emissions come from agriculture. Forest plantations offer a good potential to mitigate global warming by C sequestration in wood, biomass and in soil. Soil is a major C pool, but its dynamics is complex and requires in-depth studies about how its management can maximize C sequestration. The present study aimed to assess changes in soil physical and chemical properties, and in soil organic carbon (SOC) concentrations and stocks under short- and intermediate rotation forest plantations in a tropical cool, high altitude (1,350 m a.s.l.) area in the extreme south of Minas Gerais, Brazil. Thus, soil samples to a 40 cm depth were randomly taken in triplicate from an Udult under a native rainforest and nearby plantations of *Araucaria angustifolia*, *Cunninghamia lanceolata*, *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus maidenii* e *Pinus patula*. Soil physical, chemical, mineralogical and micromorphological analyses were conducted, as well as SOC concentrations and particle-size fractionation. The soil under native vegetation was a sandy clay loam, highly acidic and with low fertility, suggesting that forests take up nutrients from subsoil layers and biogeochemical cycling. Higher soil bulk densities occurred in subsoil layers, most likely due to lower SOC contents. Soil physical properties such as aggregate stability in water did not change under forest plantations, but soil bulk density decreased under *Araucaria* and *Cunninghamia* stands. Despite soil acidity and low fertility, planted forests achieve good productivities, and local climate and gibbsitic mineralogy favor SOC accumulation. SOC concentrations as elevated as 103,5 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm depth) and stocks of 202,4 Mg ha<sup>-1</sup> were found under *Araucaria* stands, much higher than usually reported for most well-drained soils in Brazil. The sand particle-size fraction was SOC-poor, suggesting that most SOC in these soils is comprised by humic substances, due to high C turnover. A significant SOC sequestration of ca. 50 Mg ha<sup>-1</sup> (0-20 cm depth) occurred under *Araucaria*, but not other species, in comparison to the native rainforest.

Keywords: Soil organic matter. *Araucaria angustifolia*. *Cunninghamia lanceolata*. *Eucalyptus maidenni*. *Pinus patula*.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Mapa do Estado de Minas Gerais destacando o local da amostragem. .... 29
- Figura 2 Difratoograma com a composição mineralógica da fração argila do solo sob mata nativa Coka/Fe. .... 43
- Figura 3 Difratoograma com a composição mineralógica da fração areia do solo sob mata nativa Coka/Fe. .... 44
- Figura 4 Seções delgadas do solo sob mata nativa, mostrando estrutura granular com alta macroporosidade, grãos de feldspato (f), quartzo (q) e mica (m), luz polarizada parcialmente cruzada, comprimento da imagem 0,9 mm. .... 45
- Figura 5 Densidade do solo sob diferentes usos florestais e profundidades. Barras representam o erro padrão da média. .... 57
- Figura 6 Imagens digitalizadas das seções delgadas de solo (profundidade 0-8 cm). Cada imagem possui 2 cm de largura. Notar os grandes bioporos sob Araucária e cunninghamia, e a massa densa sob eucalipto. .... 57
- Figura 7 Teores de carbono orgânico do solo sob diferentes usos florestais e profundidades. Barras representam o erro padrão da média. .... 66
- Figura 8 Seções delgadas do solo (luz polarizada cruzada, imagem com largura 2,3 mm) mostrando: A) Solo com coloração escura caracterizando altas concentrações de COS; B) Carvão entre agregados sob araucária; C) Excrementos; D) Raiz entre grãos de quartzo e grânulos. .... 68
- Figura 9 Distribuição do COS total por fração de tamanho sob cunninghamia (Cun), mata nativa (Mn), eucalipto (Euc),

	cupressus (Cup), araucária (Ar) e pinus (pin) na profundidade 0 a 5 cm. Barras representam o erro padrão da média. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer ( $p < 0,05$ ). .....	71
Figura 10	Distribuição do carbono orgânico do solo sob cunninghamia (Cun), mata nativa (Mn), eucalipto (Euc), cupressus (Cup), araucária (Ar) e pinus (pin) na profundidade 10 a 20 cm. Barras representam o erro padrão da média. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer ( $p < 0,05$ ). .....	72
Figura 11	Fracionamento do carbono orgânico do solo sob cunninghamia (Cun), mata nativa (Mn), eucalipto (Euc), cupressus (Cup), araucária (Ar) e pinus (pin) na profundidade 0 a 5 cm. Carbono orgânico do solo da fração areia (COS-areia); carbono orgânico do solo da fração argila + silte (COS- argila + silte). .....	73
Figura 12	Fracionamento do carbono orgânico do solo sob cunninghamia (Cun), mata nativa (Mn), eucalipto (Euc), cupressus (Cup), araucária (Ar) e pinus (pin) na profundidade 10 a 20 cm. Carbono orgânico do solo da fração areia (COS-areia); carbono orgânico do solo da fração argila + silte (COS-argila + silte). .....	74
Figura 13	Foto em lupa mostrando a fração areia do solo sob mata nativa. Evidenciando o baixo teor de carbono orgânico do solo e alta concentração de grãos de quartzo angulares. ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Localização, altitudes, declividades, espécies e observações das áreas amostradas.....	31
Tabela 2	Valores médios para argila, areia, silte e densidade do solo (Ds), em solo sob mata nativa em diferentes profundidades.....	41
Tabela 3	Propriedade químicas do solo sob mata nativa em diferentes profundidades.....	47
Tabela 4	Resultado da ANOVA para as características químicas do solo.....	47
Tabela 5	Características químicas em relação à acidez do solo sob diferentes espécies florestais e profundidades.....	50
Tabela 6	Características químicas em relação à fertilidade do solo sob diferentes espécies florestais e profundidades.....	52
Tabela 7	Micronutrientes do solo sob diferentes espécies florestais e profundidades.....	55
Tabela 8	Resultado da ANOVA para as características físicas do solo.....	56
Tabela 9	Densidade (Ds), diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) do solo sob diferentes usos e profundidades.....	59
Tabela 10	Granulometria do solo sob diferentes usos e profundidades.....	62
Tabela 11	Resultado da ANOVA para o teor de carbono orgânico no solo e na fração areia.....	63
Tabela 12	Teores de carbono orgânico do solo ( $\text{g kg}^{-1}$ ) sob diferentes usos florestais e profundidades.....	65
Tabela 13	Estoque de carbono orgânico do solo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) nas camadas de 0-20 e 0-40 cm de profundidade e matéria seca da serapilheira sob diferentes usos florestais.....	67

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Aquecimento global e sequestro de carbono.....	17
2.2	Carbono orgânico do solo.....	18
2.3	Carbono orgânico do solo sob florestas plantadas.....	22
3	JUSTIFICATIVA.....	26
4	OBJETIVOS.....	27
5	HIPÓTESES.....	28
6	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
6.1	Local.....	29
6.2	Amostragem do solo.....	30
6.3	Preparo das amostras de solo.....	32
6.4	Análises químicas do solo.....	32
6.4.1	pH do solo.....	32
6.4.2	Determinação de P e K disponíveis.....	33
6.4.3	Determinação do fósforo remanescente (P-rem).....	33
6.4.4	Determinação de Ca, Mg e Al.....	34
6.4.5	Determinação da acidez potencial (H + Al).....	34
6.4.6	Determinação de micronutrientes: Zn, Fe, Mn, Cu e B.....	34
6.5	Análises físicas do solo.....	35
6.5.1	Densidade do solo.....	35
6.5.2	Análise granulométrica do solo.....	35
6.5.3	Estabilidade de agregados em água.....	36
6.6	Carbono orgânico do solo.....	37
6.6.1	Carbono orgânico particulado do solo.....	37
6.6.2	Estoques de carbono no solo.....	38
6.7	Amostragem da serapilheira do solo.....	38
6.8	Difratometria de Raios-X.....	39
6.8.1	Argila orientada.....	39
6.8.2	Difratometria da fração areia.....	40
6.9	Micromorfologia do solo.....	40
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
7.1	Caracterização do solo.....	41
7.2	Efeitos do reflorestamento na acidez e fertilidade do solo.....	47
7.3	Efeitos do reflorestamento nas propriedades físicas do solo.....	56
7.4	Carbono orgânico do solo.....	63
8	CONCLUSÃO.....	76
	REFERÊNCIAS.....	77

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas ligadas às mudanças no uso da terra, queimadas, consumo de combustíveis fósseis e outras são responsáveis por grandes emissões de gases de efeito estufa (GEEs) como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), e despertam preocupação mundial devido ao aquecimento global resultante.

No Brasil, a agricultura é importante fonte desses GEE, devido ao rápido desmatamento e manejo intensivo do solo, o que despertou a preocupação com a qualidade do solo e seu uso sustentável. Segundo Brown (1981), entende-se por sustentabilidade todo uso de recurso que satisfaça as necessidades da sociedade, sem diminuir as perspectivas de uso pelas gerações futuras. Nesse contexto, o desenvolvimento de agroecossistemas sustentáveis com potencial de mitigar as emissões dos gases de efeito estufa é cada vez mais importante, sendo que a pesquisa nessa área é relativamente recente no Brasil.

Embora o desmatamento e as queimadas emitam muito  $\text{CO}_2$ , o uso posterior da terra na agropecuária também o faz. A aração e a gradagem são as principais práticas agrícolas que estimulam a ação decompositora dos organismos sobre os resíduos vegetais e carbono orgânico do solo (COS), pela ruptura dos agregados e conseqüentes mudanças da aeração, temperatura e umidade do solo e contato físico do resíduo com a biota decompositora (BAYER; MIELNICZUK, 1999; ROSCOE; BODDEY; SALTON, 2006). Dessa forma, espera-se que solos manejados com sistemas que propiciem menor revolvimento emitam menos  $\text{CO}_2$  para a atmosfera em comparação a sistemas que adotam preparo anual convencional do solo. É importante destacar também a escolha de espécies vegetais com alta produção de biomassa, pois favorecem o maior aporte de resíduos orgânicos e COS, principalmente em solos tropicais

úmidos, onde as altas temperaturas e precipitações médias anuais favorecem a decomposição.

Os plantios florestais vêm se destacando como formas de sequestrar CO<sub>2</sub> da atmosfera na forma de madeira e biomassa, porém seu efeito no COS não é muito claro. No Brasil, os plantios florestais ocupam quase 7 milhões de ha envolvendo principalmente *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.*. Embora outros gêneros sejam usados em menor escala, há poucas informações sobre sua silvicultura e efeitos sobre o ambiente e o solo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2011).

Este trabalho tem por objetivo estudar as mudanças no teor e estoque de COS sob diferentes plantios de espécies florestais de ciclo médio e curto em clima tropical de altitude no Sul de Minas Gerais, tendo como hipóteses: a) os plantios florestais de ciclo médio podem sequestrar mais COS em relação à floresta nativa, e b) esse potencial de sequestro varia com a espécie plantada.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aquecimento global e sequestro de carbono

O efeito estufa é o processo no qual parte da radiação solar de onda longa emitida pela superfície terrestre é absorvida por alguns gases da atmosfera. Consequentemente, o calor retido por esses GEEs, principalmente CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, é reemitido à superfície terrestre e atmosfera, aquecendo-a em aproximadamente 30° C, o que é de vital importância para vida na Terra. Porém, segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2007)*, o aumento exagerado dos GEEs na atmosfera, decorrente de atividades humanas ligadas às mudanças no uso da terra, queimadas, consumo de combustíveis fósseis, dentre outras, provoca o que chamamos de aquecimento global. Dentre suas consequências, destaca-se o derretimento das capas de gelo e *permafrost*, aumento do nível dos oceanos e alterações drásticas na sazonalidade e intensidade da precipitação, contribuindo para intensificar processos de desertificação e degradação ambiental.

A conversão dos ecossistemas naturais para diferentes sistemas agrícolas contribui mundialmente com cerca de 24% das emissões de CO<sub>2</sub>, 55% das emissões de CH<sub>4</sub> e 85% do total das emissões de N<sub>2</sub>O (IPCC, 2007). No entanto, no Brasil o efeito dessas mudanças do uso da terra é mais acentuado, representando cerca de 75, 91 e 94% do total de emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O do país, respectivamente (CERRI; CERRI, 2007).

Lal (2008) destaca que são necessárias estratégias para mitigar o aquecimento global, que devem se basear em diminuir as emissões dos GEEs e aumentar seu sequestro. Uma alternativa para a mitigação do aquecimento global seria a retirada de parte do CO<sub>2</sub> da atmosfera, o que é chamado de sequestro de carbono (CONFERÊNCIA DE QUIOTO, 1997). O sequestro de

carbono pode ser obtido pela atividade florestal, por meio da preservação de áreas florestais nativas, recuperação de florestas e outras áreas degradadas, e pelo estabelecimento de novas plantações florestais, o que vem sendo feito principalmente em plantações comerciais em larga escala (YU, 2002).

## **2.2 Carbono orgânico do solo**

O carbono existente na Terra divide-se em duas formas, uma orgânica, presente nos organismos vivos e matéria orgânica dos solos, rochas e água, e outra inorgânica, presente nos minerais e gases como CO e CO<sub>2</sub>. O carbono circula no estado líquido, gasoso e sólido pelos oceanos, atmosfera e terra através de um ciclo biogeoquímico.

O sequestro de carbono por meio das atividades agrícolas e florestais é baseado na retirada de CO<sub>2</sub> da atmosfera pela vegetação, por meio da fotossíntese, sendo usado no crescimento e metabolismo e estocado na biomassa vegetal. As plantas lenhosas armazenam carbono em madeira e outros tecidos até a sua morte e decomposição, fase em que o carbono poderá evoluir para as formas de gás carbônico, monóxido de carbono ou metano, ou poderá ficar incorporado ao solo como matéria orgânica em diferentes estágios de decomposição (COSTA; SILVA; AUKLAND, 2000).

Lal (2008) destaca que o solo é um dos principais reservatórios ativos de C na biosfera, com aproximadamente 1.550 bilhões de toneladas como carbono orgânico do solo (COS). O COS pode ser dividido em três grupos (os pouco alterados, os mais alterados e a biomassa), os quais condicionam significativamente e diferentemente características químicas, físicas e biológicas do solo. O primeiro é constituído por compostos pouco alterados pela decomposição microbiana, como proteínas, aminoácidos, carboidratos, celulose, hemiceluloses e lignina, que representam de 10 a 15 % da reserva total de COS. O segundo grupo,

representando de 85 a 90 % do COS, compreende as substâncias húmicas, que sofreram pronunciada degradação química e biológica, formando estruturas complexas com grande estabilidade (SANTOS et al., 2008). Outro grupo do COS inclui a biomassa, especialmente a microbiana, que desempenha papel fundamental na degradação e humificação do COS, mas não será tratada aqui devido a sua quantidade, relativamente desprezível.

Em solos tropicais úmidos, o COS tem grande importância como fonte de nutrientes para as culturas, na retenção de cátions, complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes, agregação e aeração do solo, fonte de C e energia para os microrganismos, dentre outras funções, que o tornam o atributo que melhor representa a qualidade do solo (SANTOS et al., 2008). O uso do COS como indicador da qualidade do solo baseia-se também na sua alta sensibilidade às práticas de manejo e sua estreita relação com os atributos citados acima. Nos solos tropicais úmidos, pode haver dificuldades em manter os teores de COS devido às altas temperaturas e precipitações pluviométricas, resultando em aceleração dos processos biogeoquímicos e maiores taxas de decomposição (SANTOS et al., 2008). Entretanto, essas perdas podem ser contrabalançadas pelas maiores taxas de produção de biomassa e de resíduos, e também reduzidas pela adoção de sistemas de manejo que não revolvem o solo e mantêm o COS preservado fisicamente nos agregados.

A proteção física do COS deriva da oclusão dos constituintes orgânicos dentro dos macroagregados e/ou macroporos do solo, dificultando a aeração e acesso dos organismos decompositores, o que retarda, mas não impede sua degradação (RESCK et al., 2008). Ainda, polissacarídeos provenientes do metabolismo microbiano, decomposição de resíduos e exsudação radicular são importantes compostos orgânicos (OADES, 1984) que, aliados às hifas dos fungos, promovem a estabilidade dos macroagregados dos solos, aumentando essa proteção física.

Segundo Freixo et al. (2002) o COS pode ser separado em diferentes compartimentos, que podem apresentar diferentes velocidades de decomposição, dependendo de seu tamanho de partícula, localização física no solo e mesmo densidade. O carbono orgânico particulado (COP) é aquele associado à fração mais grosseira do solo (areia), e concentra a maioria do COS mais prontamente decomponível, composto por raízes finas e tecidos foliares, mas também por alguns materiais recalcitrantes, como carvão e acículas de coníferas. Por outro lado, o COS ligado às frações menores (argila + silte) é em geral mais humificado, o que leva a uma decomposição mais lenta, sendo menos suscetível a ação dos microrganismos e preparo do solo, apesar de ter razão C:N menor ( $\pm 10/1$ ) do que o COS mais grosseiro (ZINN et al., 2007a, 2007b). A flotação em água ou em meio mais denso permite obter o COS leve livre (COL), que geralmente é a fração composta por materiais vegetais e animais pouco alterados, em grande parte correspondente ao COP. O COS pesado corresponde aproximadamente aquele associado às frações argila e silte. De modo geral, os resultados de pesquisas com esses compartimentos de COS evidenciam que sistemas de manejo que favorecem adições frequentes de resíduos orgânicos ao solo tendem a apresentar maior proporção de C na fração lábil (COP ou COL), em comparação com a fração recalcitrante (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995; CHAN; BOWMAN; OATES, 2001; CONTEH; BLAIR; ROCHESTER, 1998).

As formas lábeis de C têm grande importância em vários processos no solo, podendo ser ressaltados a formação e estabilização de agregados (PASSOS et al., 2007) e fonte de nutrientes e energia para organismos (ROSA et al., 2003). Portanto, a manutenção dos estoques de COP é essencial para a melhoria na qualidade do solo e a sustentabilidade de sistemas de produção (BLAIR; LEFROY; LISLE, 2006; VIEIRA et al., 2007).

Por outro lado, o COS associado à argila e silte evidencia uma proteção química, resultante da adsorção dos colóides ou moléculas orgânicas com a

superfície dos minerais da argila, estabilizando assim o COS. Estas interações com Filossilicatos, mas especialmente com óxidos de ferro e alumínio, predominantes na fração argila da maioria dos solos tropicais devido ao avançado grau de intemperismo, caracterizam o controle textural e mineralógico sobre o COS (RESCK et al., 2008). Diferentes mecanismos têm sido sugeridos para explicar o controle textural e mineralógico no estoque de COS, destacando-se a grande superfície específica da fração argila, e as atrações superficiais preferenciais entre as substâncias húmicas e os óxidos de ferro e alumínio do solo (BARTHÈS et al., 2008; ZINN et al., 2007a, 2007b).

Zinn et al. (2007a, 2007b) estudando o potencial do controle edáfico na retenção de COS no cerrado brasileiro, concluíram que o controle estrutural (proteção intra-agregados) da retenção de COS é bem menos significativo do que o textural e mineralógico, uma vez que a agregação depende dessas propriedades e o aumento do tamanho médio dos agregados não resultou em aumento nos estoques de COS.

A quantidade de resíduos orgânicos adicionados e os valores de COS observados em determinadas condições edafoclimáticas depende das espécies vegetais e dos sistemas de manejo utilizados. A manutenção ou recuperação dos teores e qualidade do COS pode ser alcançada pela utilização de métodos de preparo do solo sem revolvimento ou com o mínimo de mobilização do solo e por sistemas de culturas com alta e constante adição de resíduos, resultando em menores taxas de perdas e maiores taxas de adição de COS abrangendo sistemas mais sustentáveis. Bayer e Mielniczuk (1997), comparando sistemas de preparo convencional e sistemas de plantio direto, concluíram que a utilização de sistemas de manejo do solo sem revolvimento e alta adição de resíduos culturais por cinco anos foi capaz de promover melhorias na qualidade química e física do solo, indicando a sua viabilidade na recuperação de solos degradados, em médio prazo. Segundo Bayer et al. (2000), a redução do revolvimento do solo resulta

numa diminuição das taxas de perdas de COS, devido à menor disponibilidade de oxigênio e a maior proteção física do COS intra-agregados, que contribuem para diminuir a decomposição. Segundo Miranda, Canellas e Nascimento (2007), solos florestais normalmente possuem maior conteúdo de COS do que solos agrícolas, devido à maior deposição de material e à menor taxa de mineralização na floresta.

A altitude juntamente com a temperatura média anual são determinantes no equilíbrio de COS. De acordo com a literatura, solos localizados em maiores altitudes, com menor temperatura média, mantêm maiores teores e estoques de COS em função da menor taxa de decomposição da matéria orgânica (TAN et al., 2004; WANG et al., 2002; ZINN et al., 2010). Lima (2004), em estudo realizado em Minas Gerais, verificou que o município de Belo Oriente, por apresentar menor altitude e conseqüente maior temperatura média anual, quando comparado à da região de Virginópolis, apresentou menor teor de COS, devido às maiores taxas de decomposição. Em acordo, Zinn et al. (2010), estudando perfis de COS no Sul de Minas Gerais, verificou maiores teores de COS em altitudes mais elevadas (1000 a 1200 m), atribuindo-os a menores taxas de decomposição do COS devido às temperaturas mais baixas em altitude.

### **2.3 Carbono orgânico do solo sob florestas plantadas**

Os reflorestamentos com espécies de rápido e médio crescimento são uma forma eficiente de sequestrar CO<sub>2</sub> da atmosfera na forma de madeira e biomassa, devido às altas produtividades dessas florestas (GATTO, 2005), em especial as de ciclo curto, como os plantios de *Eucalyptus* e *Pinus spp.* O setor florestal brasileiro tem se destacado atualmente devido às altas produtividades desses dois gêneros, que em curto período de tempo produzem madeira de uso múltiplo (para polpa de celulose, energia, serrarias, etc.).

Em 2011, a área total de florestas plantadas de *Eucalyptus* e *Pinus spp.* no Brasil atingiu mais de 6 milhões de ha, apresentando um crescimento de 2,5 % em relação ao total de 2008, sendo estimados para 2020 mais de 9 milhões de ha plantados com estas espécies. Esse acréscimo é função do crescimento de 4,4% na área plantada com *Eucalyptus spp.*, apesar da queda de 2,1% na área com *Pinus spp.* O Brasil possui atualmente cerca de 4,5 milhões de ha plantados com *Eucalyptus spp.*, destacando-se os Estados de Minas Gerais e São Paulo, com aproximadamente 1,3 e 1,0 milhões de ha. O plantio com *Pinus spp.* ocupa aproximadamente 2 milhões de ha, sobressaindo-se os Estados do Paraná e Santa Catarina, com cerca de 695 e 551 mil ha, respectivamente, enquanto Minas Gerais possui aproximadamente 140 mil ha plantados (ABRAF, 2011).

As áreas de florestas plantadas com *Eucalyptus spp.* estão em franca expansão na maioria dos estados brasileiros com tradição na silvicultura, ou em estados considerados como novas fronteiras da silvicultura. A expansão na área plantada com *Eucalyptus spp.* é resultado de um conjunto de fatores que vêm favorecendo o plantio em larga escala desse gênero. Entre os aspectos mais relevantes estão o rápido crescimento em ciclo de curta rotação, a alta produtividade e a expansão da demanda por empresas que utilizam sua madeira em processos industriais, em particular do segmento de celulose e papel. Por outro lado, a pequena queda observada na área de florestas plantadas com *Pinus spp.* é explicada, em parte, pela decisão de algumas empresas do setor em substituir gradativamente florestas de ciclos médios por florestas de ciclo curto.

Os impactos ambientais do reflorestamento têm sido estudados em seus diferentes aspectos, inclusive em relação ao ciclo do carbono. Embora plantios florestais possam sequestrar muito C na biomassa, seu efeito no COS é bem menos claro. Paul et al. (2002), em revisão sobre a mudança nos teores e estoques de COS após reflorestamento, observaram que o acúmulo de COS em rotações florestais aumenta com o tempo de rotação e idade dos plantios (20-50

anos). Ainda, esses autores verificaram mudanças significativas devidas ao tipo de florestas, com maior teor de COS sob espécies folhosas, pouca mudança sob eucalipto, e diminuição do COS sob *Pinus sp.*, atribuindo esse fato à variação na produção de raízes e acículas e a lenta decomposição destas.

Segundo Melloni et al. (2008), em estudo conduzido em Delfim Moreira-MG, o plantio de eucalipto conduzido em espaçamento que permite o desenvolvimento de sub-bosque é semelhante ao de araucária implantada quando se leva em consideração a qualidade do solo. O sub-bosque atrai diferentes tipos de macro e microrganismo, devido à vasta composição da serapilheira formada, favorecendo assim a qualidade do solo. Pulrolnik et al. (2009) estudando a mudança no estoque de COS no Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais, em um Latossolo Vermelho Amarelo muito argiloso, verificaram que a substituição da vegetação nativa do Cerrado por eucalipto, mesmo com enleiramento e queima de resíduos, não resultou na diminuição do estoque de COS após 20 anos de cultivo. Esses mesmos autores observaram um incremento nas quantidades de C e N na matéria orgânica leve sob cultivo do eucalipto, o que contribuiu para o aumento do COS até 1 metro de profundidade.

No Brasil, Zinn, Resck e Silva (2002) encontraram perdas de COS sob plantio inicial de eucalipto em relação ao Cerrado nativo, mas estas foram revertidas ao fim da 2<sup>o</sup> rotação, conduzida por rebrota (ZINN; LAL; RESCK, 2011). Lima et al. (2006), estudando o plantio de eucalipto em pastagens degradadas no Sudeste brasileiro, observou um grande potencial de sequestro de COS sob eucalipto nesta região. Contudo, Fialho e Zinn (2012), em análise comparativa da literatura brasileira, não encontraram mudanças médias significativas no teor e estoque de COS sob eucalipto quando comparado a vegetações nativas no Brasil, e concluíram que, em média, perdas de COS e da fertilidade a ele associado não são uma preocupação no Brasil. Contudo, não há também tendências de sequestro de COS, mesmo em idades mais avançadas.

Wilcke e Liliencron (2004) constataram que houve restabelecimento do teor de C na superfície (0-30 cm) após 20 anos de plantio de *Pinus caribaea* em solos anteriormente ocupados por vegetação de Cerrado em Uberlândia-MG, sem efeito em subsuperfície. Porém, Zinn, Resck e Silva (2002) reportaram na mesma área perda de COS sob pinus em superfície e sem efeitos também para subsuperfície, sugerindo uma variabilidade ainda pouco explicada nessas camadas.

Apesar do apresentado acima, pouco se sabe sobre o efeito de plantios florestais com espécies de ciclo intermediário (i.e., 10 a 50 anos) no Brasil. Segundo Golfari, Caser e Moura (1978), essas espécies se adaptam bem em climas com verões frescos e úmidos e invernos frios e secos, sem deficiência hídrica, e com solos férteis, profundos e bem drenados. No Brasil essas espécies têm sido predominantemente plantadas em áreas de clima mais frio, o que adiciona ainda maior complexidade a seu estudo, pois isto proporciona uma menor taxa de decomposição microbiana do COS (RESCK et al., 2008).

### **3 JUSTIFICATIVA**

- a) Pouco se sabe sobre o efeito de plantios florestais com espécies de ciclo intermediário (10 a 50 anos) em solos do Brasil.
- b) Espécies de ciclo intermediário têm sido plantadas predominantemente em áreas de maior altitude e/ou clima mais frio, onde as condições de crescimento e decomposição orgânica são diferentes das demais regiões brasileiras.

#### **4 OBJETIVO**

Este trabalho visa estudar as mudanças em propriedades químicas, físicas, e no teor e estoque de COS sob diferentes plantios de espécies florestais de ciclo médio em clima tropical de altitude no Sul de Minas Gerais.

## **5 HIPÓTESES**

- a) Plantios florestais de ciclo médio podem realizar sequestro de COS em relação às florestas nativas.
- b) O potencial de sequestro varia com a espécie florestal plantada.

## 6 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.1 Local

No extremo Sul de Minas Gerais na cidade de Camanducaia (Figura 1), mais precisamente na Fazenda Levantina, de propriedade da empresa florestal Melhoramentos S/A, espécies florestais de ciclo médio e curto são plantadas há mais de 60 anos para produção de polpa de celulose. A empresa florestal Melhoramentos S/A tem o marco na história da indústria nacional de papel, pois foi a primeira a produzir celulose no Brasil em 1943 (ASSOCIAÇÃO DE HOTÉIS E POUSADAS DE MONTE VERDE - AHPMV, 2010).

O estudo foi realizado na Fazenda Levantina. A fazenda está localizada a cerca de 280 km ao Sul de Lavras e ocupa cerca de 12 mil ha, a maioria sob florestas nativas de reserva legal e área de preservação permanente. Os plantios ocupam aproximadamente 4.000 ha, e compreendem principalmente espécies dos gêneros *Pinus*, *Eucalyptus*, *Cunninghamia* e *Araucaria*.

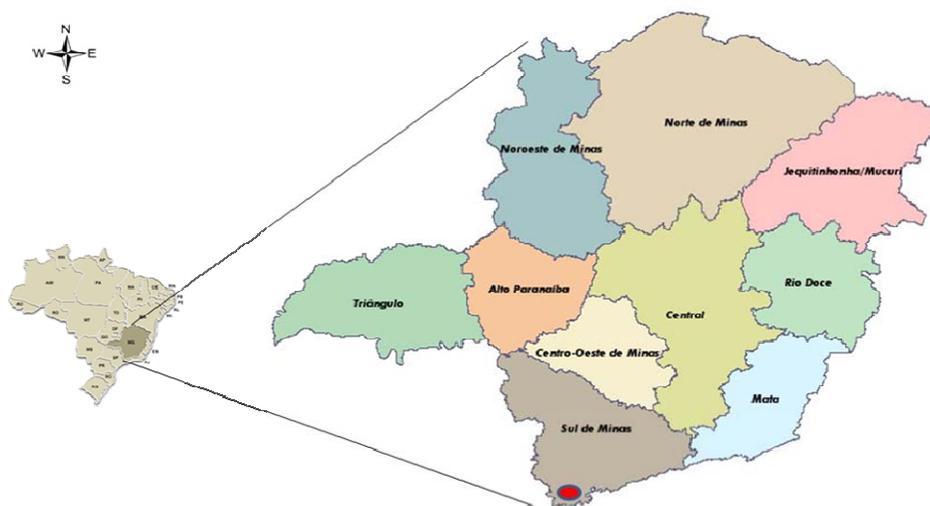


Figura 1 Mapa do Estado de Minas Gerais destacando o local da amostragem

O clima (Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb) é em geral mais frio do que no restante do Sul de Minas Gerais, por sua localização elevada na Serra da Mantiqueira, com altitudes variando entre 1.035 a 2.041 m. A precipitação média anual (1952-2009) é de 1.642 mm (Cia Melhoramentos, dados não divulgados) concentrada entre os meses de outubro a março. A temperatura média anual entre os anos de 2000 e 2010 foi de 16,3°C segundo a estação de medição de Monte Verde (INMET, 2012). A maior parte da área plantada da empresa está concentrada entre as cotas 1.200 e 1.700 m de altitude. A rocha de origem é o Granito Gonçalves/Granito Serra do Lopo, do Neoproterozoico (HEINECK et al., 2003).

## 6.2 Amostragem do solo

Para a amostragem do solo, foram selecionadas áreas com altitudes de aproximadamente 1.350 metros, cultivadas com:

- a) *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (1898), conífera da família *Araucariaceae* (GOLFARI; CASER; MOURA, 1978), plantada em 1950 em área anteriormente ocupada por floresta nativa, com rotação de aproximadamente trinta anos;
- b) *Cunninghamia lanceolata* (Lambert) Hooker (1827), espécie arbórea de gimnosperma da família *Cupressaceae*, originária da região Sul da China (GOLFARI; CASER; MOURA, 1978), plantada em 1964 e com rotação de trinta anos;
- c) *Cupressus lusitanica* Miller (1768), pertencente à mesma família da *Cunninghamia*, mas com origem desconhecida (GOLFARI; CASER; MOURA, 1978), plantado em 1995, com rotação de trinta anos;

- d) *Eucalyptus maidenii* (F. Muell) plantado em 1992, com rotação de sete anos (GOLFARI; CASER; MOURA, 1978);
- e) *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., plantado em 2004, com rotação de quinze anos (GOLFARI; CASER; MOURA, 1978).

Os plantios do *Eucalyptus maidenii* e *Pinus patula* foram feitos em áreas anteriormente cultivadas com coníferas. O cultivo do solo foi sempre feito com preparo manual. Uma Mata Ombrófila nativa foi amostrada como controle. As áreas amostradas são próximas e com solos de mesma classe e declive aproximadamente similar (Tabela 1).

Tabela 1 Localização, altitudes, declividades, espécies e observações das áreas amostradas

<b>Espécie</b>	<b>Alt.(m)</b>	<b>Declive</b>	<b>Lat. S</b>	<b>Long. W</b>	<b>Obs.</b>
<b>Cupressus</b>	1377	14°	22°49'366"	46°04'595"	Sub-bosque ralo composto por musgo, sem serapilheira (folhas milimétricas)
<b>Cunninghamia</b>	1342	35°	22°49'517"	46°05'110"	Nenhum sub-bosque (muito escuro)
<b>Pinus</b>	1350	8°	22°49'279"	46°04'769"	Sem sub-bosque, com camada de acículas
<b>Araucária</b>	1359	15°	22°49'574"	46°04'466"	Sub-bosque + arbustos fortes, serapilheira foliar
<b>Eucalipto</b>	1350	9°	22°49'279"	46°04'769"	Sub-bosque alto, serapilheira de galhos + casca
<b>Mata</b>	1370	18°	22°49'574"	46°04'466"	Sub-bosque rico, serapilheira

Em talhões próximos, buscando a homogeneidade, foram selecionadas áreas ao acaso para coleta de amostras compostas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm. Em cada local de amostragem, foram abertas trincheiras para coleta de amostras indeformadas, com o uso de anéis volumétricos de aço e

volume interno conhecido, para determinação da densidade do solo. Amostras deformadas foram coletadas nas mesmas profundidades, com o uso de pá ou trado holandês. Foram coletadas também na superfície de área amostras de solos indeformadas na camada de 0-8 cm, com uso de cilindro de alumínio para realização das análises de micromorfologia.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com seis tratamentos correspondentes aos talhões supracitados, em quatro profundidades e três repetições, totalizando 72 parcelas.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e os dados dos tratamentos submetidos ao teste de Tukey-Kramer ( $P < 0,05$ ), utilizando os programas estatísticos JMP 5.1, SAS/STAT e Sigma Plot 9.0.

### **6.3 Preparo das amostras de solo**

As amostras deformadas foram secadas ao ar e passadas em conjunto de peneiras de malhas 8,00; 4,75 e 2,00 mm, para obtenção de material para análise de agregados e terra fina seca ao ar (TFSA) para análises físicas e químicas.

### **6.4 Análises químicas do solo**

As análises químicas do solo foram determinadas segundo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997), conforme detalhado a seguir.

#### **6.4.1 pH do solo**

O pH do solo foi determinado em água na proporção 1:2,5 com 10 cm<sup>3</sup> e água destilada. Agitou-se com bastão de vidro por aproximadamente 30

segundos, sendo deixado em repouso por 1 hora e, logo após, foi realizada a leitura em potenciômetro com eletrodo combinado.

#### **6.4.2 Determinação de P e K disponíveis**

Para extração de P e K disponíveis, colocou-se em um erlenmeyer de 250 ml, 10 cm<sup>3</sup> de TFSA e adicionou-se 100 ml de solução extratora Mehlich-1 (HCl 0,05 N + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 N), seguido por 5 minutos em agitador circular horizontal e repouso durante aproximadamente 16 horas.

Para determinação de P, foram pipetados 5 ml do sobrenadante, adicionado 10 ml de solução ácida de molibdato de amônio diluída e ácido ascórbico como redutor, agitando-se e deixando em repouso por 30 minutos, para desenvolver a cor. Foi feita a leitura no fotolorímetro, usando filtro vermelho (comprimento de onda = 725 nm).

Para determinação do K, foram pipetados 20 ml do sobrenadante do extrato e realizada a leitura no fotômetro de chama.

#### **6.4.3 Determinação do fósforo remanescente (P-rem)**

Para determinação do P-rem foi adicionado em um erlenmeyer de 125 ml, 5 cm<sup>3</sup> de TFSA e 50 ml de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P. O preparado foi agitado por 5 minutos e deixado em repouso durante aproximadamente 16 horas. Tomou-se uma alíquota de 10 ml do sobrenadante em balão volumétrico de 50 ml, completando-se o volume com água destilada. Misturou-se 5 ml da solução diluída com 5 ml da solução coquetel (solução 725 + ácido ascórbico). Decorrido 30 minutos, foi feita a leitura da absorvância no comprimento de onda de 725 nm. O P-rem foi calculado considerando a diluição realizada (5 vezes).

#### **6.4.4 Determinação de Ca, Mg e Al**

Para extração de Ca, Mg e Al, colocou-se em um erlenmeyer de 250 ml, 10 cm<sup>3</sup> de TFSA e adicionou-se 100 ml de solução extratora KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, agitando-se durante 5 minutos em agitador circular horizontal, seguido por repouso durante aproximadamente 16 horas. Após este período, o Ca e Mg foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al determinado por titulação com NaOH 0,0125 mol L<sup>-1</sup> utilizando 3 gotas do indicador azul de bromotimol.

#### **6.4.5 Determinação da acidez potencial (H + Al)**

Para extração da acidez potencial do solo, foram colocados 10 cm<sup>3</sup> de TFSA em erlenmeyer de 50 ml. Adicionou-se 25 ml de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, adicionar 5 ml de solução SMP, agitando-se por aproximadamente 15 minutos. Deixar em repouso durante 1 hora e fazer a leitura sem agitar a amostra. A avaliação da acidez potencial de solos é pela depressão causada no pH da solução tampão.

#### **6.4.6 Determinação de micronutrientes: Zn, Fe, Mn, Cu e B**

Para determinação dos micronutrientes, em erlenmeyer de 125 ml adicionou-se 10 cm<sup>3</sup> de TFSA passada na peneira de 2,00 mm e 50 ml de solução extratora de Mehlich-1 (HCl 0,05 N + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 N), agitando-se por 5 minutos, e filtrando-se imediatamente a suspensão. No filtrado, foram determinados os micronutrientes Zn, Fe, Mn, Cu, B e o macronutriente S por espectrofotometria de absorção atômica.

## 6.5 Análises físicas do solo

Foram realizadas as análises físicas do solo: densidade do solo, granulometria do solo e estabilidade de agregados em água, conforme detalhado a seguir.

### 6.5.1 Densidade do solo

A determinação da densidade do solo ( $D_s$ ) foi realizada pelo método do anel volumétrico, segundo EMBRAPA (1997).

Amostras de solo indeformadas, coletadas com anéis volumétricos de Kopecky foram pesadas e colocadas em estufa a 105°C durante 24 a 48 horas, e pesadas, determinando assim a massa de solo seco. A  $D_s$  foi calculada pela fórmula:

$$D_s = M_s / V$$

Onde:

$D_s$ : densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );

$M_s$ : massa seca do solo (g);

$V$ : volume interno do anel volumétrico ( $\text{cm}^{-3}$ ).

### 6.5.2 Análise granulométrica do solo

As análises granulométricas foram realizadas pelo método da pipeta, de acordo com EMBRAPA (1997), porém, com utilização de agitação lenta de 50 rpm por 16h (RUIZ, 2005). Foram pesadas 10g de TFSA em garrafas de 500 ml e adicionados 10 ml de NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> e aproximadamente 50 ml de água destilada, até cobrir a amostra. As garrafas foram alocadas em agitador rotatório de 360°, onde ficaram em agitação lenta por 16 horas. Toda a suspensão foi

passada por peneira de 0,053 mm para proveta de 500 ml, onde completou-se o volume com água destilada. A fração areia, retida na peneira de 0,053 mm, foi colocada em béquer previamente tarado e identificado, o qual foi levado a estufa a 105°C por aproximadamente 24 horas, após o que a fração areia foi pesada e quantificada. Para a determinação de argila e silte foi medida a temperatura da suspensão e estipulado o tempo de sedimentação da menor partícula de silte (53  $\mu\text{m}$ ) segundo a Lei de Stokes, considerando a densidade de partícula igual a 2,65  $\text{g cm}^{-3}$ . Depois de decorrido o tempo de sedimentação devido, foi pipetada uma alíquota de 10 ml da suspensão a uma profundidade de 5 cm e transferida para um béquer tarado e identificado, o qual foi levado a estufa a 105°C por aproximadamente 24 horas, após o que o material foi pesado e quantificado. O silte foi quantificado por diferença.

### **6.5.3 Estabilidade de agregados em água**

Para determinação da distribuição de agregados do solo, foram utilizados 25 g de TFSA de agregados com diâmetro entre 8,0 e 4,75 mm. As amostras foram previamente umedecidas de forma lenta com pulverizador e mantidas em repouso sob temperatura ambiente por 2 horas, de forma a permitir a penetração da água nos agregados, minimizando assim sua destruição pela rápida expulsão do ar pela água (*slaking*). Na sequência, a amostra pré-umedecida foi disposta na parte superior do conjunto de peneiras de um aparelho de oscilação vertical do tipo Yoder (calibrado com 24 oscilações por minuto), formado por unidades de malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; e 0,105 mm de diâmetro. Transcorridos 15 minutos de oscilação, as amostras retidas em cada peneira foram transferidas para vasilhas de alumínio com auxílio de jatos de água. As vasilhas foram encaminhadas para estufa a 105 °C, onde permaneceram por um

período de 24 horas, antes da pesagem. A partir dos valores de massa seca obtidos, calculou-se o DMP e DMG, segundo Nimmo e Perkins (2002).

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n (n_i d)$$

$$\text{DMG} = 10^X$$

$$X = [\sum_i^n (n_i \log d) / \sum_i^n n]$$

onde:

$n_i$  = % dos agregados retidos em uma determinada peneira (forma decimal);

$d$  = diâmetro médio de uma determinada faixa de tamanho de agregados.

## 6.6 Carbono orgânico do solo

As análises de carbono orgânico do solo (COS) foram realizadas pelo método da combustão seca em analisador elementar CHNS modelo Vario<sup>®</sup> TOC Cube, onde é medido o CO<sub>2</sub> produzido após combustão da amostra a 950°C em coluna cromatográfica.

Amostras de TFSA passadas na peneira de 2,00 mm foram trituradas em almofariz e passadas em peneira de 60 mesh para sua homogeneização devido à pequena quantidade utilizada na análise. Pesou-se aproximadamente 15 mg da amostra finamente moída em folhas de estanho, onde foram embrulhadas e colocadas no analisador elementar para análise.

### 6.6.1 Carbono orgânico particulado do solo

O carbono orgânico particulado (COS-areia, COS contido na fração areia) foi obtido após dispersão em NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> similar à utilizada para análise textural, segundo Zinn et al. (2007 a). A fração areia retida na peneira de

0,053 mm, obtida durante a análise granulométrica do solo pelo método da pipeta, foi triturada em almofariz e passada em peneira de 60 mesh para homogeneização. Pesou-se aproximadamente 20 mg da mesma em folhas de estanho, onde foram embrulhadas e colocadas no analisador elementar para análise de C total, conforme 2.4. Foram utilizadas as profundidades 0-5 e 10-20 cm. O COS da fração argila+silt (COS-argila+silt) foi obtido pela diferença entre o COS e o COS-areia.

### 6.6.2 Estoques de COS

O estoque de COS foi obtido pela soma dos estoques em cada camada de solo, calculados pelo produto do teor de COS, densidade do solo e profundidade da respectiva camada em todas as repetições, conforme a seguinte fórmula (ZINN; LAL; RESCK, 2005):

$$\text{COS} = \text{C} \times (\text{Ds}) \times \text{volume}$$

em que:

COS: carbono orgânico do solo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );

C: teor de carbono do solo ( $\text{Mg Mg}^{-1}$ );

Ds: densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );

Volume do solo:  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (calculado a partir da profundidade da camada (m)  $\times 10.000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ).

### 6.7 Amostragem da serapilheira do solo

Em cada talhão selecionado, foi coletada a serapilheira em três repetições com a utilização de um gabarito de 0,5 x 0,5 m jogado aleatoriamente próximo a área de coleta do solo.

Para a obtenção da matéria seca, a serapilheira foi cuidadosamente separada em folhas e cascas (quando presentes) e galhos, que foram colocadas em sacos de papel e secadas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C até peso constante. Com base nesses dados, calculou-se a matéria seca de cada componente.

## **6.8 Difratomia de Raios-X**

As análises de difratometria de raios-x foram realizadas e interpretadas segundo Resende et al. (2005).

### **6.8.1 Argila orientada**

As frações argila e silte, isoladas da fração areia por tamisamento na análise granulométrica do solo da mata nativa referência, nas profundidades 0-5 e 20-40 cm, foram separadas pipetando a fração argila após decorrido o devido tempo de sedimentação segundo a Lei de Stokes. A argila pipetada foi saturada com  $MgCl_2$  concentrado e centrifugada a 3000 rpm durante 15 minutos, sendo descartado o sobrenadante e recuperada a argila até que a quantidade fosse suficiente para análise. Em seguida, 5 ml de uma suspensão de argila foi pipetada sobre lâminas de vidro, formando uma película com a evaporação à temperatura ambiente, permitindo que os minerais planares se depositassem paralelamente uns aos outros, intensificando assim os picos diagnósticos. Após a secagem, as lâminas foram levadas ao difratômetro de raios-x Phillips<sup>®</sup> PW 1830/1840 (Lelyweg, Holanda), com radiação  $CoK\alpha$  com filtro de Fe, em passos de  $0,01^\circ$ , no intervalo de  $2-40^\circ 2\theta$ , a 25 mA/35kV.

### **6.8.2 Difractometria da fração areia**

A fração areia separada por tamisamento na análise granulométrica do solo foi moída em almofariz e colocada em porta-amostra do tipo “janela” e levada ao difratômetro de raio-x para análise conforme descrito para a argila, porém no intervalo 10-80° 2 $\theta$ .

### **6.9 Micromorfologia do solo**

As amostras coletadas, após secagem, foram impregnadas com resina epóxi Silaex SQ 2003/3182<sup>®</sup> curadas a 100°C por 4 horas e 140°C por 5 horas, cortadas, polidas, coladas em lâminas de vidro, novamente cortadas e desgastadas até espessura máxima de 30  $\mu$ m para descrição micromorfológica em microscópio petrográfico, conforme Stoops (2003).

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Caracterização do solo

No presente estudo, utilizou-se como referência o solo sob mata nativa, classificado como Argissolo Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2006), com classe textural argilo-arenosa (Tabela 2), segundo Santos et al. (2005).

Tabela 2 Valores médios para argila, areia, silte e densidade do solo (Ds), em solo sob mata nativa em diferentes profundidades

Argila	Areia	Silte	DMG	DMP	Ds
----- g kg <sup>-1</sup> -----			--- mm ---		Mg m <sup>-3</sup>
----- <b>0 a 5 cm</b> -----					
340	490	170	4,48	4,82	0,87
----- <b>5 a 10 cm</b> -----					
340	500	160	4,76	4,90	1,09
----- <b>10 a 20 cm</b> -----					
340	510	150	4,79	4,92	1,21
----- <b>20 a 40 cm</b> -----					
310	530	160	4,64	4,84	1,33

Com base no difratograma de raio-x, a fração argila é composta pelos minerais caulinita, gibbsita, com traços de goethita, mica, quartzo e feldspatos, sendo a gibbsita dominante no solo (Figura 2). O balanço entre caulinita e gibbsita nos solos é condicionado basicamente pela lixiviação de sílica, decorrente da evolução pedogenética em clima tropical úmido. Assim, quando a dessilicatização é moderada, a caulinita é favorecida, e em condições de dessilicatização total, forma-se a gibbsita (CAMPOS et al. 2008; RESENDE et al., 2007). A Figura 2 demonstra a baixa cristalinidade da caulinita e o predomínio de gibbsita, o que sugere altíssima dessilicatização. Contudo, a

presença de pequenos picos de quartzo e feldspatos, inesperados nestas condições de extremo intemperismo, sugere certo processo de rejuvenescimento por erosão, pois minerais alteráveis estão talvez sendo aportados à superfície do solo, onde são rapidamente intemperizados diretamente para gibbsita. Isto é, evidenciado na figura 4, que mostra grãos de feldspatos e mica na fração areia, como sugerem Calvert, Buol e Weed (1980), Clemente e Azevedo (2007) e Ker e Resende (1990).

A estrutura granular do solo estudado, evidenciada na sessão delgada sob mata nativa (figura 4), pode ser explicada pela composição mineralógica do solo. A caulinita tende a se ajustar face a face, aumentando o contato e o grau de coesão entre as partículas do solo. Segundo Resende (1990), os óxidos de ferro e alumínio (goethita e gibbsita) e a matéria orgânica tendem a produzir estrutura granular. O predomínio de gibbsita promove a formação de estruturas granulares e, conseqüentemente, grande presença dos macroporos (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; RESENDE et al., 2007). A ocorrência da estrutura do tipo granular no solo da mata pode estar relacionada também à ação biogênica, devido ao alto aporte de matéria orgânica. Embora incomum, sabe-se que Argissolos podem possuir estrutura granular em superfície, mesmo sendo cauliniticos (PORTUGAL, 2005).

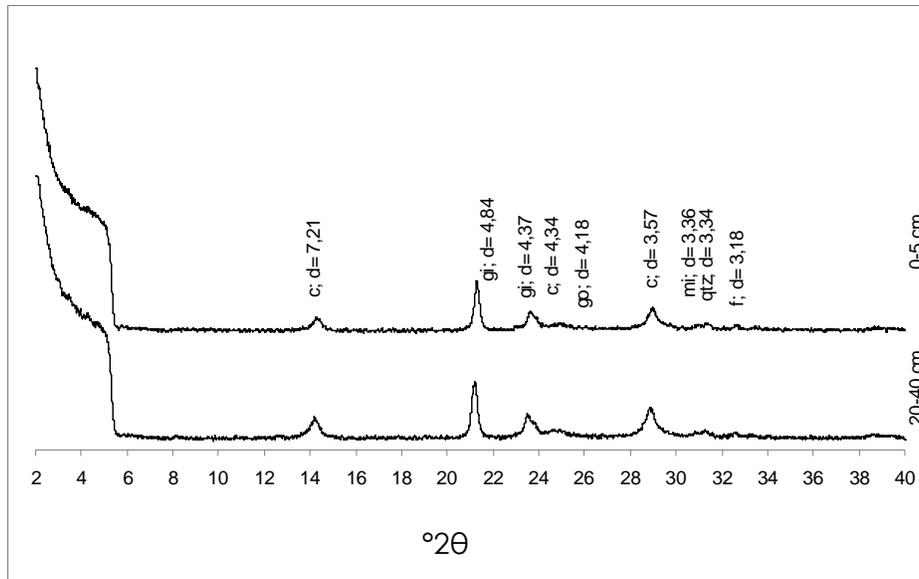


Figura 2 Difratoograma com a composição mineralógica da fração argila do solo sob mata nativa (Cok $\alpha$ /Fe).

Nota: c – caulinita; gi – gibbsita; go – goethita; mi – mica; qtz – quartzo; f – feldspato

O difratograma de raio-x da fração areia mostra a predominância de quartzo, com traços de gibbsita, caulinita e vermiculita (Figura 3). O arranjo compacto dos tetraedros de silício que compõem a estrutura do quartzo confere a esse mineral uma grande resistência ao intemperismo (INDA JÚNIOR; KLAMT; NASCIMENTO, 2006). É possível que a gibbsita ocorra como alteromorfos em grãos de feldspatos alterados.

Jacomine et al. (1973) descrevem mineralogia semelhante em Argissolos situados na Zona da Mata mineira e interpretam que estes são altamente intemperizados e, praticamente, desprovidos de reserva mineral que possa liberar nutrientes para as plantas, nas frações areia grossa e fina. Tal não deve ser o caso presente, pois embora não apareçam picos de feldspatos na fração areia, esse mineral foi notado no difratograma de fração argila e em seções

delgadas de micromorfologia (figura 4). A presença destes feldspatos pode estar relacionada a maiores níveis de K no solo (Tabela 3).

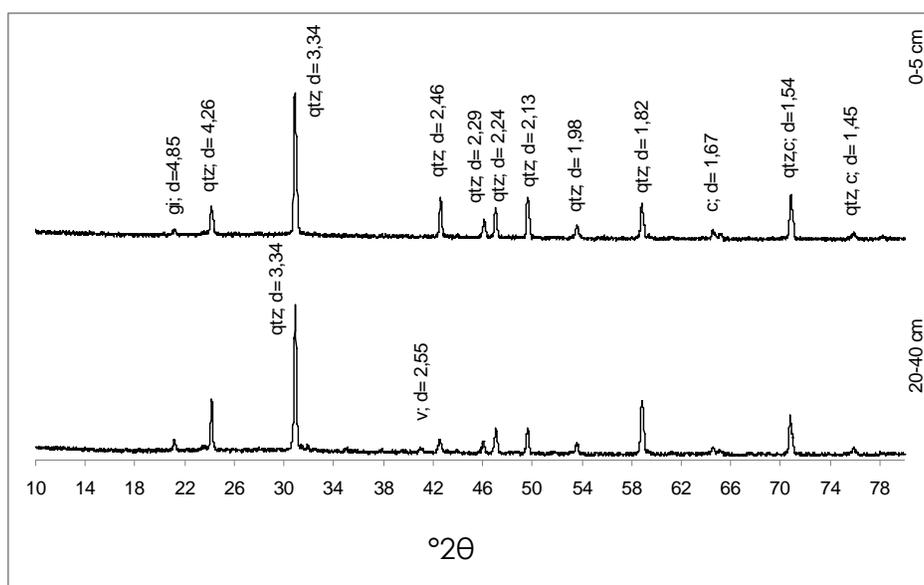


Figura 3 Difratoograma com a composição mineralógica da fração areia do solo sob mata nativa (Coka/Fe).

Nota: c – caulinita; gi – gibbsita; qtz – quartzo; v – vermiculita

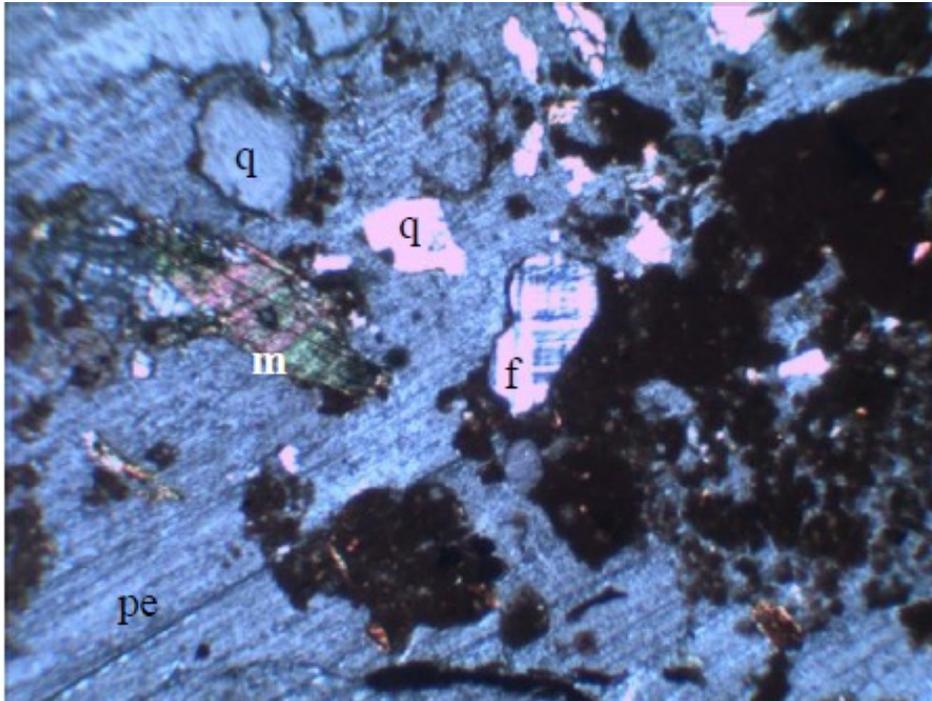


Figura 4 Seções delgadas do solo sob mata nativa, mostrando estrutura granular com alta macroporosidade, grãos de feldspato (f), quartzo (q) e mica (m), luz polarizada parcialmente cruzada, comprimento da imagem 0,9 mm.

Obs. pe = poros de empilhamento

Com relação às propriedades físicas do solo, a mata apresenta baixa  $D_s$  em superfície e aumento da mesma em profundidade, variando de 0,87 a 1,33  $Mg\ m^{-3}$  nas camadas de 0-5 e 20-40 respectivamente (tabela 2), provavelmente devido à maior macroporosidade em superfície, resultado da bioturbação, e diminuição de COS, em acordo com resultados de Araújo, Goedert e Lacerda (2007), Kato et al. (2010) e Suzuki (2008).

Para representar a estabilidade dos agregados em água, utilizou-se o diâmetro médio geométrico (DMG) e ponderado (DMP) que facilitam a comparação entre solos e camadas. Não foram observadas grandes variações em

relação ao DMG e DMP sob mata nativa em relação às profundidades (tabela 2). Altos valores foram verificados para DMG e DMP, variando de 4,48 a 4,79 mm e 4,82 a 4,92 mm respectivamente (tabela 2), indicando alta estabilidade de agregados em água, provavelmente devido às altas concentrações de gibbsita, COS e à quantidade de serapilheira, raízes e exsudados orgânicos provenientes dessas, que favorecem a agregação do solo (KATO et al., 2010; PORTUGAL; COSTA; COSTA, 2010).

Esse solo apresenta acidez elevada, com pH variando de muito baixo a baixo e saturação por alumínio (m) variando de 78,6 a 63,6 % (tabela 3), sendo classificada como alta e muito alta, respectivamente, segundo Alvarez V. et al. (1999). Os altos valores da saturação por alumínio, assim como as altas concentrações de  $Al^{+3}$  e acidez potencial são, provavelmente, devido à composição mineralógica do solo, rica em gibbsita, e ao alto teor de COS (tabela 12).

O Argissolo estudado apresenta baixa fertilidade, com baixos teores de P, K, Ca e Mg, excetuando os teores de K na camada de 0-5 cm (tabela 3), que são considerados altos, segundo Alvarez V. (1999). Como os teores dos nutrientes, com exceção do K, são muito baixos, a mata provavelmente supre parte de suas exigências nutricionais em subsuperfície e/ou pela ciclagem de nutrientes, através da decomposição da sua serapilheira por microrganismos.

Os baixos teores de nutrientes são explicados, em parte, pelo fato de que nesse ambiente grande parte dos nutrientes está alocada na vegetação, além da pobreza química do solo, devido ao alto grau de intemperismo (PORTUGAL et al., 2008; PORTUGAL; COSTA; COSTA, 2010). O solo apresenta caráter distrófico, devido às grandes perdas por lixiviação e/ou erosão.

Tabela 3 Propriedade químicas do solo sob mata nativa em diferentes profundidades

pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+AL	SB	(t)	(T)	V	m
H <sub>2</sub> O	mg dm <sup>-3</sup>				----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		--- % ---	
----- 0 a 5 cm -----											
4,4	2,7	65,0	0,3	0,4	1,9	17,1	0,8	2,7	17,9	4,5	70,4
----- 5 a 10 cm -----											
4,6	1,6	42,7	0,1	0,2	1,4	18,1	0,4	1,8	18,5	2,2	78,6
----- 10 a 20 cm -----											
4,8	0,8	29,3	0,1	0,1	1,0	10,7	0,3	1,3	11,0	2,6	78,1
----- 20 a 40 cm -----											
5,0	0,7	18,3	0,1	0,1	0,4	5,4	0,2	0,7	5,7	4,3	63,6

## 7.2 Efeitos do reflorestamento na acidez e fertilidade do solo

Os atributos químicos do solo foram significativamente afetados pelo plantio das diferentes espécies em cada profundidade (Tabela 4).

Tabela 4 Resultado da ANOVA para as características químicas do solo

Fonte de variação	pH	H+Al	Al	m	P	Prem	K	Ca	Mg	S	SB	t	T	V
<b>0 – 5 cm</b>														
Espécie	***	***	ns	***	***	***	***	**	***	ns	**	***	***	***
<b>5- 10 cm</b>														
Espécie	**	**	*	ns	ns	ns	**	ns	*	***	*	**	**	ns
<b>10 – 20 cm</b>														
Espécie	**	***	ns	***	***	**	*	ns	**	***	ns	***	***	***
<b>20 -40 cm</b>														
Espécie	***	***	***	***	**	***	ns	ns	***	ns	***	***	***	***

\* significativo a P<0.05; \*\* a P<0.01; \*\*\* a P<0.001; n.s. não significativo.

A tabela 5 apresenta a média dos indicadores de acidez, para cada tratamento e profundidade. Embora os valores de pH sejam variáveis, pode-se dizer que o solo possui um pH relativamente baixo. Em geral, há um aumento do pH do solo em profundidade para todos os tratamentos, que provavelmente está associado a menores teores de COS (Tabela 12) e N total (POTAFÓS, 2003). Aliado a isso, verifica-se uma diminuição do teor de acidez trocável em profundidade, em acordo com o pH do solo, já que o Al tóxico às plantas diminui à medida que o pH aumenta (ALVAREZ V. et al., 1999; SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Observa-se também um aumento significativo do pH dos solos sob reflorestamento, quando comparado com a mata nativa até a profundidades de 20 cm, com exceção da área sob araucária, provavelmente associada aos altos teores de materiais orgânicos incorporados ao solo sob esta espécie (Tabela 12). Os teores de Al variaram significativamente entre os usos apenas nas profundidades de 5-10 e 20-40 cm (Tabela 5), com maiores valores ocorrendo para araucária (2,2 e 1,0  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  respectivamente) e menores para o pinus (1,0 e 0,4  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) (tabela 5). Segundo a classificação de Alvarez et. al (1999), estes teores de Al variam entre baixo a muito alto.

Os valores de acidez potencial ( $\text{H} + \text{Al}$ ) também variaram entre os usos para todas as profundidades estudadas, destacando-se a araucária com os maiores valores, mostrando a mesma tendência do alumínio e COS (tabela 12), e menores valores para o cupressus (Tabela 5). As diferenças significativas na acidez potencial entre os usos florestais com maiores valores para a área sob araucária podem ser explicadas pelos altos teores de  $\text{H}^+$  trocável no solo, devido aos altos teores de COS (Tabela 12) observados. Isso porque, a matéria orgânica do solo apresenta várias carboxilas e grupos funcionais com H ionizáveis, que irão compor os sítios envolvidos na capacidade de troca de cátions do solo (CTC) (PORTUGAL; COSTA; COSTA, 2010; RANGEL; SILVA, 2007;

SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). Em geral, são observados altos valores para saturação por alumínio (m).

Tabela 5 Características químicas em relação à acidez do solo sob diferentes espécies florestais e profundidades

Usos do solo	pH	Al	H + Al	m
		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		%
		----- 0 a 5 cm -----		
<b>Araucária</b>	4,59 B	2,9 A	25,7 A	58,7 B
<b>Cunninghamia</b>	4,95 A	2,1 A	16,5 B	73,4 AB
<b>Cupressus</b>	5,06 A	2,2 A	12,3 C	70,7 AB
<b>Eucalipto</b>	5,04 A	1,9 A	15,3 BC	83,9 A
<b>Pinus</b>	5,13 A	1,0 A	14,8 BC	23,7 C
<b>Mata nativa</b>	4,67 B	1,9 A	17,1 B	70,3 AB
		----- 5 a 10 cm -----		
<b>Araucária</b>	4,79 B	2,2 A	20,6 A	79,3 A
<b>Cunninghamia</b>	5,10 A	2,1 AB	15,3 ABC	70,3 A
<b>Cupressus</b>	5,28 A	1,3 AB	8,5 C	72,6 A
<b>Eucalipto</b>	5,19 A	1,3 AB	11,0 BC	80,5 A
<b>Pinus</b>	5,08 A	1,0 B	13,2 ABC	58,6 A
<b>Mata nativa</b>	4,84 B	1,4 AB	18,1 AB	78,6 A
		----- 10 a 20 cm -----		
<b>Araucária</b>	4,99 C	2,7 A	17,1 A	85,7 A
<b>Cunninghamia</b>	5,21 B	1,8 A	12,3 B	74,8 AB
<b>Cupressus</b>	5,44 A	0,5 A	6,0 C	53,8 C
<b>Eucalipto</b>	5,21 B	1,0 A	9,8 B	77,7 AB
<b>Pinus</b>	5,10 BC	0,9 A	12,3 B	67,3 BC
<b>Mata nativa</b>	4,97 C	1,0 A	10,7 B	78,0 AB
		----- 20 a 40 cm -----		
<b>Araucária</b>	5,14 B	1,0 B	12,3 A	80,0 A
<b>Cunninghamia</b>	5,27 B	1,7 A	10,3 AB	75,6 AB
<b>Cupressus</b>	5,52 A	0,3 C	5,1 C	50,4 D
<b>Eucalipto</b>	5,24 B	0,4 C	6,0 C	65,5 BC
<b>Pinus</b>	5,29 B	0,4 C	7,3 C	54,3 CD
<b>Mata nativa</b>	5,14 B	0,4 C	5,4 C	63,6 C

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer ( $p < 0,05$ ).

Os teores de P, Ca, Mg e, conseqüentemente soma de bases (SB), são muito baixos para todas as profundidades e espécies (Tabela 6), provavelmente por não haver adubação corretiva nas áreas e haver intensa absorção pelas plantas, destacando-se somente o teor de Ca na camada de 0-5 cm na área sob pinus e araucária, que apresenta teores considerados médios por Alvarez V. et al. (1999). O mesmo ocorreu para soma de bases, que apresentou valores muito baixos. O P-rem, que foi muito baixo em todos os solos, em acordo com a mineralogia gibbsítica, correlaciona-se muito bem com P disponível, de modo que quando P-rem menores que  $15 \text{ mg L}^{-1}$ , os teores de P são considerados baixos ( $0-5 \text{ mg dm}^{-3}$ , Cantarutti et al., 2007). Com relação aos teores de K, observa-se altos teores ( $> 60 \text{ mg dm}^{-3}$ ) para todos os tratamentos na camada de 0-5 cm, ocorrendo uma redução dos mesmos em profundidade. É possível que estes teores altos de K derivem da presença e intemperismo corrente do feldspato e mica (Figura 2, 4), que são absorvidos pelas árvores em camadas mais profundas e concentrados na camada 0-5 cm com a queda de serapilheira. Nas camadas superficiais, a área sob cultivo de *Cupressus* diferenciou-se estatisticamente das demais apresentando 119 e  $100 \text{ mg dm}^{-3}$  nas profundidades de 0-5 cm e 5-10 cm, respectivamente (Tabela 6). Os valores de CTC a pH 7,0 (T) também variaram entre os usos para todas as profundidades estudadas, destacando-se a araucária com os maiores valores, mostrando a mesma tendência do COS em superfície (Tabela 12), e menores valores para o cupressus (Tabela 6). Porém, nas camadas mais profundas os maiores valores de CTC a pH 7,0 em solo sob araucária se devem, provavelmente aos exsudados radiculares. Os valores de CTC a pH 7,0 variaram de 27,9 a  $5,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , sendo esses valores classificados como médios a muito bons, de acordo com Alvarez V. et al. (1999). Os altos valores encontrados provavelmente são devidos aos altos teores de COS, contribuindo com o  $\text{H}^+$  trocável.

Tabela 6 Características químicas em relação à fertilidade do solo sob diferentes espécies florestais e profundidades

Usos do solo	P	K	Ca	Mg	SB	T	P-rem
	---- mg dm <sup>-3</sup> ----		----- cmol <sub>e</sub> dm <sup>-3</sup> -----			mg L <sup>-1</sup>	
----- 0 a 5 cm -----							
<b>Araucária</b>	2,8 BC	79,0 B	1,4 AB	0,5 B	2,1 AB	27,9 A	4,2 C
<b>Cunninghamia</b>	4,4 A	74,3 B	0,1 B	0,4 BC	0,7 B	17,2 BC	11,8 AB
<b>Cupressus</b>	2,0 BC	119 A	0,1 B	0,2 BC	0,6 B	12,9 C	7,6 BC
<b>Eucalipto</b>	1,6 C	66,0 A	0,1 B	0,1 C	0,4 B	15,7 BC	4,5 C
<b>Pinus</b>	3,2 AB	60,6 B	2,5 A	0,9 A	3,6 A	17,9 B	12,3 A
<b>Mata nativa</b>	2,6 BC	65,0 B	0,2 B	0,3 BC	0,8 B	18,5 B	6,3 C
----- 5 a 10 cm -----							
<b>Araucária</b>	1,6 A	46,3 B	0,3 A	0,1 AB	0,5 A	21,2 A	4,4 A
<b>Cunninghamia</b>	2,3 A	58,6 B	0,3 A	0,3 AB	0,8 A	16,2 AB	21,5 A
<b>Cupressus</b>	1,8 A	100 A	0,1 A	0,1 AB	0,4 A	9,0 C	5,7 A
<b>Eucalipto</b>	1,4 A	44,3 B	0,1 A	0,1 B	0,3 A	11,3 BC	3,2 A
<b>Pinus</b>	1,8 A	42,3 B	0,3 A	0,4 A	0,8 A	18,4 AB	12,0 A
<b>Mata nativa</b>	1,6 A	42,6 B	0,1 A	0,1 AB	0,3 A	14,1ABC	6,2 A
----- 10 a 20 cm -----							
<b>Araucária</b>	1,0 B	30,3 B	0,1 A	0,1 B	0,3 A	17,4 A	7,8 AB
<b>Cunninghamia</b>	2,1 A	44,6 AB	0,1 A	0,3 A	0,5 A	12,9 B	6,4 AB
<b>Cupressus</b>	1,1 B	72,0 A	0,1 A	0,1 B	0,4 A	6,5 C	4,8 B
<b>Eucalipto</b>	1,1 B	37,3 AB	0,1 A	0,1 B	0,3 A	10,1 B	2,9 B
<b>Pinus</b>	1,6 AB	41,0 AB	0,1 A	0,2 AB	0,4 A	10,9 B	12,6 A
<b>Mata nativa</b>	0,8 B	29,3 B	0,1 A	0,1 B	0,3 A	12,7 B	4,0 B
----- 20 a 40 cm -----							
<b>Araucária</b>	0,4 B	15,6 A	0,1 A	0,1 B	0,2 A	12,6 A	8,2 A
<b>Cunninghamia</b>	1,3 A	37,3 A	0,1 A	0,3 A	0,5 A	10,8 AB	4,1 B
<b>Cupressus</b>	0,8 AB	52,6 A	0,1 A	0,1 B	0,3 A	5,5 C	4,1 B
<b>Eucalipto</b>	0,5 B	17,3 A	0,1 A	0,1 B	0,2 A	6,3 C	2,8 B
<b>Pinus</b>	0,6 B	39,0 A	0,1 A	0,1 B	0,3 A	5,7 C	10,7 A
<b>Mata nativa</b>	0,7 AB	18,3 A	0,1 A	0,1 B	0,2 A	7,6 BC	4,5 B

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer (p<0,05).

Em geral, para os teores disponíveis dos micronutrientes Zn, Fe, Mn, Cu e B (Tabela 7), grande variação é observada, provavelmente devido aos diferentes materiais orgânicos incorporados ao solo e exigências de cada espécie. Altos valores de Fe e Mn, na ordem de 145 e 52 mg dm<sup>-3</sup> ocorreram, segundo critérios de Tomé Júnior (1997). Os teores de Mn nas camadas subsuperficiais das áreas sob *cunninghamia* e *araucária* diferiram estatisticamente da mata nativa, provavelmente devido ao grande aporte de biomassa e exsudados radiculares nas camadas superficiais. A área sob *cunninghamia* apresentou os maiores teores de Zn na camada de 5-40 cm diferenciando-se estatisticamente da mata nativa, porém apresentou o menor teor de Zn na camada de 0-5 cm, provavelmente devido à maior absorção nessa camada.

Como observado, os teores dos nutrientes, com exceção do K, são muito baixos, de modo que as florestas provavelmente buscam suprir suas exigências nutricionais em camadas de solo abaixo das amostradas e na ciclagem de nutrientes. Observa-se também que, apesar das diferenças significativas entre os solos, sob cada espécie, houve em geral melhoria da fertilidade do solo em relação à mata nativa, provavelmente devido à extração de nutrientes de camadas mais profundas e seu retorno ao solo pelo grande aporte de serapilheira que compõem os bosques das áreas amostradas (Tabela 13). Segundo Balieiro et al. (2004), são acumulados sobre o solo cerca de 20 a 30 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos de eucalipto pós-colheita. Já König et al. (2002) encontraram para o *pinus* acúmulo de serapilheira de 17,2 Mg ha<sup>-1</sup> e Capra (2011) encontrou para *araucária* cerca de 12 Mg ha<sup>-1</sup> ambos na região Sul do Brasil. A deposição desses resíduos devolve ao solo grande parte dos nutrientes contidos na árvore. Estima-se que, para cada tonelada de madeira gerada, seja produzido, como resíduo, 0,3 a 0,35 tonelada de serapilheira (VITAL, 2007). A decomposição desses materiais mineraliza os nutrientes e resulta no aumento da quantidade de nutrientes na interface

serapilheira-solo (GAMA-RODRIGUES; BARROS, 2002; LOUZADA; SCHOEREDER; DE MARCO, 1997). Outra fonte de nutrientes é o COS que dependendo da sua composição, atua diretamente sobre a fertilidade do solo por constituir a principal fonte de macro e micronutrientes às plantas, além de aumentar a capacidade de retenção dos nutrientes, evitando suas perdas (RICCI, 2006).

Tabela 7 Micronutrientes do solo sob diferentes espécies florestais e profundidades

Uso do solo	Zn	Fe	Mn	Cu	B
----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
----- 0 a 5 cm -----					
<b>Araucária</b>	3,06 A	145 A	51,9 A	1,10 B	0,53 A
<b>Cunninghamia</b>	0,40 C	103 A	31,0 AB	0,73 B	0,13 B
<b>Cupressus</b>	1,73 B	113 A	9,86 B	3,26 A	0,60 A
<b>Eucalipto</b>	1,30 BC	103 A	4,03 B	0,93 B	0,36 AB
<b>Mata nativa</b>	2,06 AB	149 A	31,1 AB	1,56 AB	0,40 AB
<b>Pinus</b>	1,56 BC	100 A	20,5 B	1,30 AB	0,46 AB
----- 5 a 10 cm -----					
<b>Araucária</b>	2,06 AB	91,9 B	30,1 A	1,06 B	0,70 A
<b>Cunninghamia</b>	3,86 A	80,4 B	28,4 A	1,60 AB	0,13 C
<b>Cupressus</b>	1,23 B	102 B	6,50 B	2,56 A	0,53 ABC
<b>Eucalipto</b>	0,90 B	98,2 B	3,36 B	1,00 B	0,23 BC
<b>Mata nativa</b>	1,20 B	182 A	13,4 AB	1,56 AB	0,60 AB
<b>Pinus</b>	0,86 B	69,4 B	8,30 AB	1,36 AB	0,63 AB
----- 10 a 20 cm -----					
<b>Araucária</b>	1,00B	77,1 AB	15,2 A	1,26 B	0,53 A
<b>Cunninghamia</b>	2,20A	89,6 AB	15,4 A	1,53 B	0,06 B
<b>Cupressus</b>	0,83 B	68,1 AB	3,40 B	4,66 A	0,36 AB
<b>Eucalipto</b>	0,63 B	77,2 AB	3,63 B	0,93 B	0,60 A
<b>Mata nativa</b>	0,76 B	129 A	5,56 B	1,90 B	0,30 AB
<b>Pinus</b>	0,73 B	55,0 B	4,63 B	1,33 B	0,30 AB
----- 20 a 40 cm -----					
<b>Araucária</b>	0,50 AB	56,3 B	7,16 B	1,53 B	0,20 A
<b>Cunninghamia</b>	0,83 A	140,4 A	11,1 A	2,30 AB	0,10 A
<b>Cupressus</b>	0,66 AB	43,8 B	2,36 C	3,76 A	0,20 A
<b>Eucalipto</b>	0,36 B	34,9 B	0,36 C	1,06 B	0,23 A
<b>Mata nativa</b>	0,36 B	60,2 B	1,00 C	2,06 AB	0,13 A
<b>Pinus</b>	0,33 B	21,6 B	1,10 C	1,20 B	0,40 A

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer ( $p < 0,05$ ).

### 7.3 Efeitos do reflorestamento nas propriedades físicas do solo

Os valores dos atributos físicos do solo apresentam efeito significativo dos diferentes plantios, para as diferentes profundidades (Tabela 8).

Tabela 8 Resultado da ANOVA para as características físicas do solo

Fonte de variação	Ds	DMG	DMP
<b>0 – 5 cm</b>			
Uso do solo	ns	***	***
<b>5- 10 cm</b>			
Uso do solo	*	ns	*
<b>10 – 20 cm</b>			
Uso do solo	ns	ns	ns
<b>20 -40 cm</b>			
Uso do solo	**	*	*

\* significativo a  $P < 0.05$ ; \*\* a  $P < 0.01$ ; \*\*\* a  $P < 0.001$ ; n.s. não significativo.

Talvez devido à alta variabilidade da densidade do solo (Ds) nos diferentes tratamentos, não houve diferença estatística da mata nativa de referência nas camadas de 0-5 e 10-20, embora tenha havido nas camadas de 5-10 e 20-40 cm (Tabela 9). Observa-se aumento da densidade do solo com a profundidade para todos os tratamentos (Figura 5), provavelmente devido ao maior empacotamento dos agregados, reduzindo a macroporosidade, e à diminuição do COS (ARAÚJO; GOEDERT; LACERDA, 2007; KATO et al., 2010). Nas camadas 5-10 e 20-40 cm, os menores valores de Ds foram verificados para a araucária e cunninghamia, o que também é evidenciado pelas imagens digitalizadas das seções delgadas de solo (Figura 6), onde se observa massa densa sob eucalipto e pinus e o grande volume de macroporos nos demais tratamentos, em especial na cunninghamia e araucária.

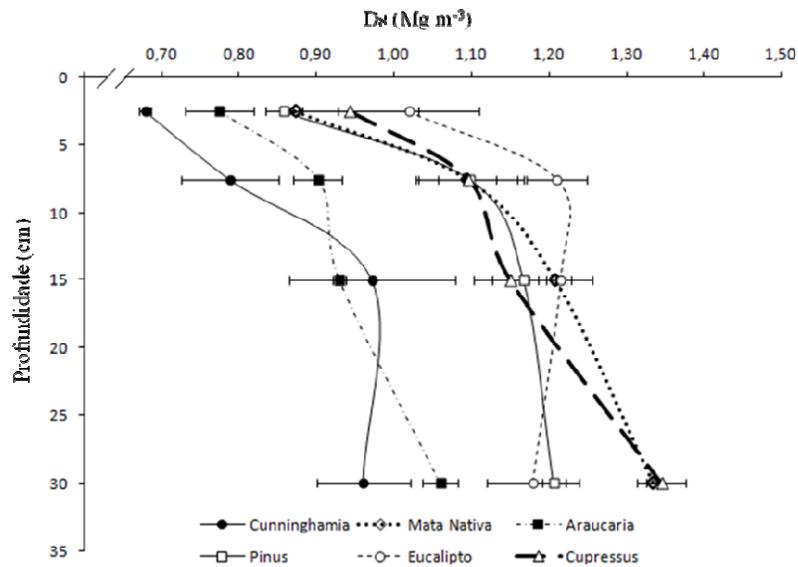


Figura 5 Densidade do solo sob diferentes usos florestais e profundidades. Barras representam o erro padrão da média

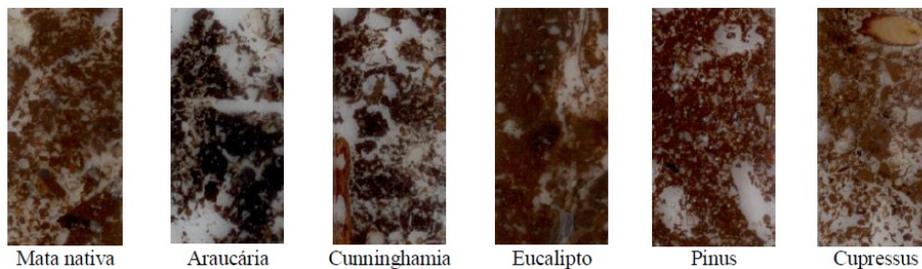


Figura 6 Imagens digitalizadas das seções delgadas de solo (camada 0-8 cm). Cada imagem possui 2 cm de largura. Notar os grandes bioporos sob araucária e cunninghamia, e a massa densa sob eucalipto

Em acordo com o atual estudo, Suzuki (2008) verificou aumento da densidade do solo com a profundidade no perfil até 1 m, avaliando florestas de eucalipto com 4,5 e 20 anos de idade e pastagem em um Argissolo Vermelho distrófico em Butiá, RS. Segundo o autor, essas diferenças de densidade podem

estar associadas com a diferença textural entre as profundidades e entre as áreas avaliadas. Por outro lado, Silva et al. (2009) verificaram aumentos da densidade na camada superficial do solo nos plantios de eucalipto e pinus, em relação à vegetação nativa e atribuíram essa diferença ao manejo utilizado, devido à passagem das máquinas nas atividades de manutenção que proporcionaram certa compactação ao solo. Tal hipótese é provável no atual estudo, pois o solo sob cunninghamia, araucária e cupressus não sofreu trânsito de máquinas nas últimas décadas, o que por outro lado ocorreu sob eucalipto e pinus.

Tabela 9 Densidade (Ds), diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) do solo sob diferentes usos e profundidades

Uso do solo	Ds		DMG		DMP	
	Mg m <sup>-3</sup>		mm		mm	
----- 0 a 5 cm -----						
<b>Araucária</b>	0,78 A	(0,04)	4,29 B	(0,05)	4,66 C	(0,03)
<b>Cunninghamia</b>	0,68 A	(0,01)	4,21 B	(0,07)	4,72 BC	(0,03)
<b>Cupressus</b>	0,94 A	(0,09)	4,78 A	(0,02)	4,91 A	(0,01)
<b>Eucalipto</b>	1,02 A	(0,09)	4,80 A	(0,05)	4,92 A	(0,02)
<b>Pinus</b>	0,86 A	(0,02)	4,76 A	(0,01)	4,90 A	(0,01)
<b>Mata nativa</b>	0,87 A	(0,0)	4,48 AB	(0,08)	4,82 AB	(0,02)
----- 5 a 10 cm -----						
<b>Araucária</b>	0,9 AB	(0,03)	4,53 A	(0,04)	4,78 AB	(0,02)
<b>Cunninghamia</b>	0,79 B	(0,06)	4,56 A	(0,02)	4,82 AB	(0,02)
<b>Cupressus</b>	1,09 AB	(0,06)	4,74 A	(0,03)	4,89 AB	(0,02)
<b>Eucalipto</b>	1,21 A	(0,04)	4,72 A	(0,02)	4,88 AB	(0,01)
<b>Pinus</b>	1,10 A	(0,07)	4,57 A	(0,03)	4,78 B	(0,02)
<b>Mata nativa</b>	1,09 AB	(0,04)	4,76 A	(0,07)	4,90 A	(0,03)
----- 10 a 20 cm -----						
<b>Araucária</b>	0,93 A	(0,01)	4,68 A	(0,01)	4,86 A	(0,01)
<b>Cunninghamia</b>	0,97 A	(0,11)	4,28 A	(0,11)	4,72 A	(0,04)
<b>Cupressus</b>	1,15 A	(0,05)	4,07 A	(0,24)	4,54 A	(0,13)
<b>Eucalipto</b>	1,21 A	(0,04)	4,40 A	(0,19)	4,83 A	(0,01)
<b>Pinus</b>	1,16 A	(0,04)	3,94 A	(0,22)	4,46 A	(0,13)
<b>Mata nativa</b>	1,21 A	(0,02)	4,79 A	(0,1)	4,92 A	(0,04)
----- 20 a 40 cm -----						
<b>Araucária</b>	1,06 B	(0,02)	4,59 A	(0,06)	4,81 A	(0,03)
<b>Cunninghamia</b>	0,96 B	(0,06)	4,24 AB	(0,08)	4,70 AB	(0,05)
<b>Cupressus</b>	1,34 A	(0,03)	3,95 AB	(0,19)	4,47 AB	(0,11)
<b>Eucalipto</b>	1,17 AB	(0,06)	4,42 A	(0,08)	4,73 AB	(0,04)
<b>Pinus</b>	1,20 AB	(0,02)	3,36 B	(0,31)	4,09 B	(0,21)
<b>Mata nativa</b>	1,33 A	(0,01)	4,64 A	(0,05)	4,84 A	(0,03)

Valores entre parêntese correspondem ao erro padrão da média. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer ( $p < 0,05$ ).

Para representar o tamanho dos agregados no solo, utilizou-se o diâmetro médio geométrico (DMG) e o ponderado (DMP), que facilitam a comparação entre agregação sob diferentes plantios florestais. Em geral, o plantio das florestas não afetou a estabilidade dos agregados em água, pois não foram observadas grandes alterações no DMP e DMG em relação à mata nativa (Tabela 9), com exceção das áreas sob araucária e cunninghamia.

Segundo Wendling et al. (2005), a maior proporção de agregados estáveis nas camadas superficiais do solo pode ser resultado de ciclos sucessivos de umedecimento e secagem, pois as camadas superficiais estão mais sujeitas a esses fenômenos. Porém, essa tendência não parece evidente nas condições do presente trabalho.

Maiores valores de DMG e DMP foram verificados para o solo sob eucalipto, 4,80 e 4,92 mm respectivamente, na camada de 0-5 cm e menores valores, 3,36 e 4,09 mm respectivamente, para área sob pinus nas camadas de 20-40 (Tabela 9). Segundo Lima (1996), os plantios florestais com eucalipto são responsáveis por melhorias nas condições do solo, principalmente no que se refere à matéria orgânica e a atividade microbiológica, o que, conseqüentemente, beneficia as suas propriedades físicas. Segundo o autor, o cultivo do eucalipto promove uma maior macroagregação do solo em comparação com áreas agrícolas e outras espécies florestais.

Reduções significativas de DMG e DMP foram observadas para os tratamentos araucária e cunninghamia na camada de 0-5 cm em relação à mata nativa (Tabela 9), o que pode ser atribuído à bioturbação por organismos atraídos pelos muitos frutos (pinhões) presentes, e ao alto teor de COS que pode desestabilizar relativamente os agregados geralmente duros dos Argissolos. Observa-se também decréscimo em profundidade do DMG e DMP para o pinus (Tabela 9) e diferenças significativas em relação à mata nativa na camada de 20-40 cm (Tabela 9), talvez devido à percolação de substâncias orgânicas derivadas

da camada de acículas em decomposição. Resultados contrastantes foram encontrados por Kato et al. (2010) em estudo realizado na fazenda Água Limpa, da Universidade de Brasília, onde o cultivo de pinus promoveu maior agregação do solo em relação ao cerrado nativo, e que o DMP dos solos das áreas de cerrado, pastagem, pinus e eucalipto não se diferenciaram estatisticamente até a profundidade de 20 cm.

Segundo Barthès et al. (2008), maior agregação do solo é observada em solo tropicais com predomínio de hidróxidos de alumínio, devido a sua maior área superficial quando comparado com hidróxidos de ferro. O mesmo pode ocorrer no atual estudo, pois o solo é composto em sua maioria por gibbsita, o que leva a formação de agregados mais estáveis e maior proteção do COS.

Com base na análise granulométrica do solo (Tabela 10), verifica-se que houve pouca variação quando se compara o uso do solo e profundidades em relação à mata nativa, com exceção da área sob *cunninghamia* que apresentou baixos teores de argila. Os solos das diferentes áreas foram classificados como de classe textural argilo-arenosa, segundo a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SANTOS et al., 2005), seguindo a mesma tendência da mata nativa, com exceção do solo sob *cunninghamia*, que se enquadra na classe textural franco argilo-arenosa.

Tabela 10 Granulometria do solo sob diferentes usos e profundidades

Uso do solo	Argila	Areia	Silte
----- g kg <sup>-1</sup> -----			
----- 0 a 5 cm -----			
Araucária	420	450	130
Cunninghamia	250	550	200
Cupressus	420	360	220
Eucalipto	390	460	150
Pinus	470	440	90
Mata nativa	350	490	160
----- 5 a 10 cm -----			
Araucária	400	490	120
Cunninghamia	250	550	200
Cupressus	400	390	210
Eucalipto	390	490	120
Pinus	450	430	120
Mata nativa	350	490	160
----- 10 a 20 cm -----			
Araucária	430	450	120
Cunninghamia	260	530	210
Cupressus	390	400	210
Eucalipto	410	470	120
Pinus	450	440	110
Mata nativa	340	510	150
----- 20 a 40 cm -----			
Araucária	440	440	120
Cunninghamia	270	540	190
Cupressus	370	370	260
Eucalipto	420	450	130
Pinus	460	420	120
Mata nativa	310	530	160

#### 7.4 Carbono orgânico do solo

Os valores do COS e COP apresentaram variação significativa sob os usos para as diferentes profundidades (Tabela 11).

Tabela 11 Resultado da ANOVA para o teor de carbono orgânico no solo e na fração areia

Fonte de variação	COS	COS areia
<b>0 – 5 cm</b>		
Uso do solo	*	***
<b>5- 10 cm</b>		
Uso do solo	***	-
<b>10 – 20 cm</b>		
Uso do solo	***	*
<b>20 -40 cm</b>		
Uso do solo	**	-

\* significativo a  $P < 0.05$ ; \*\* a  $P < 0.01$ ; \*\*\* a  $P < 0.001$ ; n.s. não significativo.

Os altos teores de COS (Tabela 12) observados em todos os tratamentos provavelmente são devidos a uma combinação da altitude elevada e consequente baixa temperatura, promovendo acúmulo de COS mais humificado, e da predominância de gibbsita e caulinita pouco cristalina, materiais de grande superfície específica que podem adsorver mais COS, promovendo a proteção física e química (BARTHÈS et al., 2008; LIMA, 2004).

De modo geral, verifica-se uma tendência de decréscimo nos teores de COS à medida que se aumenta a profundidade do solo (Figura 7), conforme observado na maioria dos solos florestais brasileiros (INÁCIO, 2009; PILLON et al., 2011; PULROLNIK et al., 2009). Os teores de COS variaram entre sistemas de uso de  $103,7 \text{ g kg}^{-1}$  a  $18,8 \text{ g kg}^{-1}$  nas camadas de 0-5 a 20-40 cm, respectivamente (Tabela 12). Essa variação, provavelmente, ocorre em razão da

maior deposição e acúmulo de resíduos em superfície, além de favorável concentração de raízes finas na superfície do solo, comparada com os menores valores de COS verificados em camadas subsuperficiais. Segundo Gatto (2005), uma possível justificativa para os maiores teores de COT na camada superficial do solo é o aporte de material orgânico, proveniente da queda de folhas, galhos e da casca das árvores, formando a manta orgânica. Lima et al. (2006), em estudo conduzido na região de Virginópolis - MG, observaram maior teor de COS sob eucalipto (cultivados há mais de 30 anos) na camada de 0-5 cm, em comparação à pastagem, atribuindo esse aumento ao maior acúmulo de serapilheira na camada superficial, tendo em vista as maiores produções de biomassa de eucalipto em relação à pastagem nesta região.

Não foram verificadas diferenças significativas do teor de COS quando comparados os diferentes usos do solo em relação à mata nativa para a camada de 0-5 cm. Isso ocorreu somente para as camadas de 5-40 cm, destacando-se o solo sob araucária e sob cunninghamia com valores altos como 76,8 e 65,5 g kg<sup>-1</sup> na camada de 5-10 cm de profundidade, já para as camadas de 10-20 e 20-40, cm os maiores teores ocorreram sob cupressus e cunninghamia (Tabela 12). Essas diferenças estão associadas, provavelmente à maior quantidade de raízes encontradas nesses sistemas e/ou translocação vertical de COS, pois sabe-se que o sistema radicular contribui substancialmente para adição de COS em subsuperfície (GATTO, 2005; LIMA, 2004; SISTI et al., 2004) . Inácio (2009) verificou incremento de COS na camada de 10-20 cm do solo sob eucalipto em relação à mata nativa e atribuiu esse aumento à elevada produção de raízes nessa camada de solo, denotando que a mata nativa possui uma grande heterogeneidade de espécies vegetais, o que torna a distribuição da deposição de material orgânico através das raízes mais heterogêneas ao longo do perfil, diferentemente de monoculturas florestais.

Observa-se também aumento do teor de COS na profundidade de 20-40 nas áreas sob espécies de coníferas (cupressus e pinus) (Tabela 12), talvez devido à percolação de substâncias orgânicas derivadas da camada de acículas em baixa taxa de decomposição.

Tabela 12 Teores de carbono orgânico do solo ( $\text{g kg}^{-1}$ ) sob diferentes usos florestais e profundidades

Uso	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm	20 a 40 cm
	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
<b>Araucária</b>	103,7 A (4,21)	76,8 A (5,05)	28,9 B (4,98)	18,8 B (1,82)
<b>Cunninghamia</b>	84,0 AB (8,88)	65,5 AB (3,61)	47,8 AB (4,51)	20,5 AB (3,76)
<b>Cupressus</b>	62,6 B (4,15)	38,6 C (3,91)	65,5 A (3,38)	34,2 A (2,77)
<b>Eucalipto</b>	55,3 B (8,28)	36,3 C (0,20)	40,8 B (1,38)	20,4 B (0,67)
<b>Pinus</b>	75,2 AB (6,58)	47,7 BC (2,64)	32,1 B (1,85)	30,3 AB (0,36)
<b>Mata nativa</b>	66,5 AB (2,64)	41,9 C (1,03)	28,1 B (1,22)	18,9 B (0,77)

Valores entre parênteses correspondem ao erro padrão da média. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

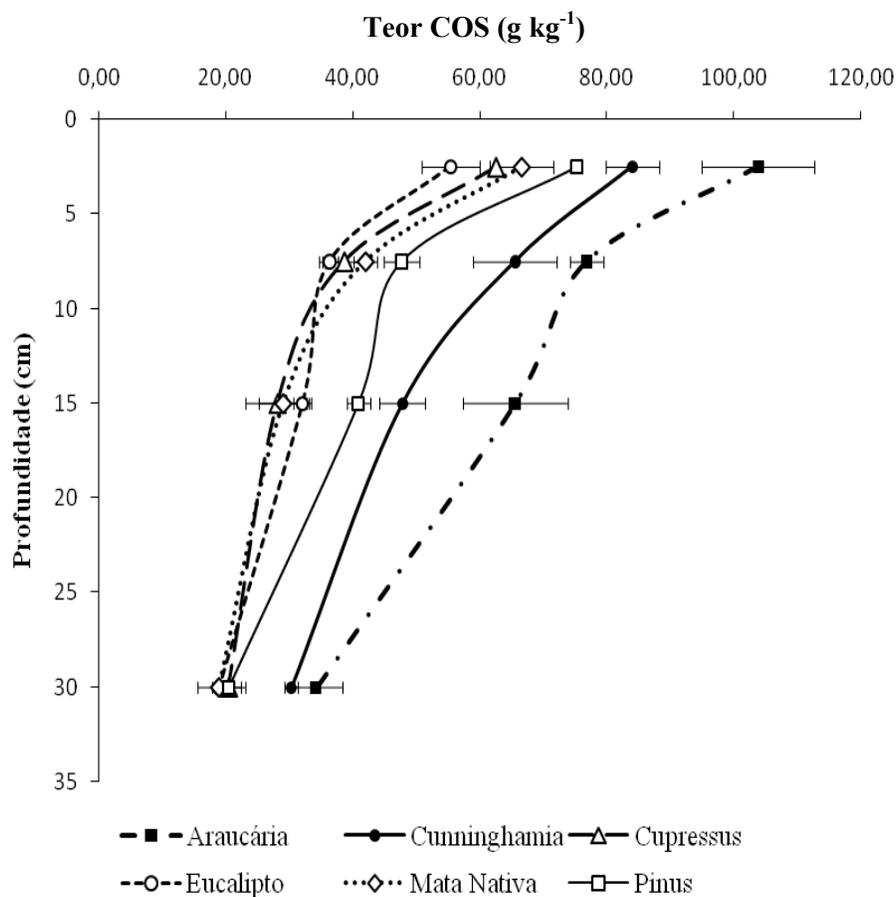


Figura 7 Teores de carbono orgânico do solo sob diferentes espécies florestais e profundidades. Barras representam o erro padrão da média

O estoque de COS foi influenciado de modo significativo pelo plantio de diferentes espécies somente na camada de 0-20 cm de profundidade (Tabela 13). Para a camada de 0-20 cm, o maior estoque de COS foi observado para o solo sob araucária, atingindo 134 Mg ha<sup>-1</sup>, diferindo significativamente da mata nativa, provavelmente devido ao aporte de serapilheira e alta bioturbação do solo

(Figura 8 C), promovendo maior acúmulo de COS, evidenciado pela coloração escura do solo (Figura 8).

Tabela 13 Estoque de carbono orgânico do solo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) nas camadas de 0-20 e 0-40 cm de profundidade e matéria seca da serapilheira sob diferentes usos florestais

Uso do solo	Estoque de COS				Matéria Seca
	0 a 5 cm	0 a 10 cm	0 a 20 cm	0 a 40 cm	Serapilheira
	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----				
<b>Araucária</b>	39,9 A (0,82)	74,3 A (1,52)	134,1 A (5,05)	202,4 A (9,64)	15,5 ABC (1,48)
<b>Cunninghamia</b>	28,6 A (3,37)	54,9 A (6,36)	97,1 AB (12,88)	155,96 A (21,94)	5,7 D (1,05)
<b>Cupressus</b>	28,9 A (1,08)	49,9 A (1,75)	81,23 B (2,24)	132,3 A (9,41)	10,4 BCD (1,09)
<b>Eucalipto</b>	28,0 A (4,85)	50,0 A (5,13)	88,8 B (3,79)	134,1 A (2,57)	17,9 AB (0,49)
<b>Pinus</b>	32,1 A (2,35)	58,3 A (3,81)	104,8 AB (7,78)	153,5 A (9,07)	19,4 A (2,01)
<b>Mata nativa</b>	29,0 A (1,17)	52,0 A (0,95)	85,5 B (1,96)	133,53 A (2,51)	8,3 CD (0,86)

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer ( $p < 0,05$ ).

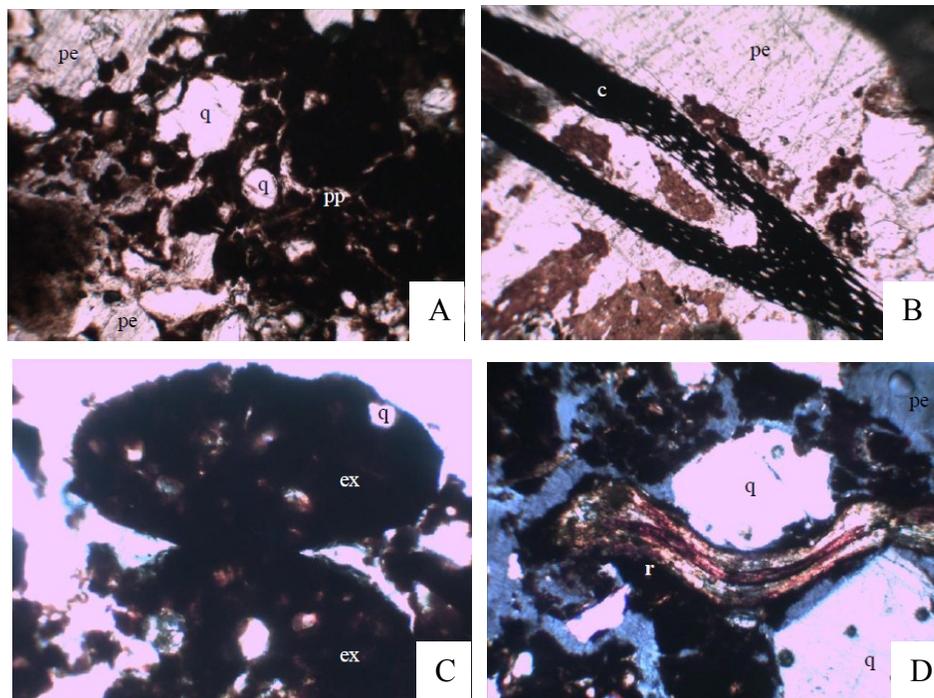


Figura 8 Seções delgadas do solo (luz polarizada cruzada, imagem com largura 2,3 mm) mostrando: A) Solo com coloração escura caracterizando altas concentrações de COS; B) Carvão entre agregados sob araucária; C) Excrementos; D) Raiz entre grãos de quartzo e grânulos

Para a camada de 0-40 cm não houve diferenças significativas entre os usos do solo (Tabela 13), provavelmente devido à alta variabilidade do solo. A mesma tendência foi observada por Rangel e Silva (2007), em estudo conduzido no município de Lavras - MG, onde os autores não verificaram diferenças significativas entre os usos do solo, porém observaram estoque de COS para eucaliptos maiores que o da mata nativa, 105,2 e 90,6 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente, na camada de 0-40 cm de profundidade. Já Pulrolnik et al. (2009), em estudo conduzido no Vale do Jequitinhonha, encontraram valores de estoque de COS significativamente diferentes, comparando solos sob eucalipto e cerrado, na

ordem de 152,4 e 132,6 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente, porém avaliando um volume maior de solo (0-100 cm).

Os estoques de COS observados neste estudo são muito altos em comparação à maioria dos solos aeróbicos brasileiros reportados na literatura, chegando a 202,4 Mg ha<sup>-1</sup> na profundidade de 0-40 cm no solo sob araucária (informação verbal)<sup>1</sup>. Os altos valores encontrados para estoque de COS em todos os tratamentos podem ser atribuídos ao grande aporte de serapilheira das florestas, aumentando as entradas de COS (Tabela 13), à baixa temperatura média anual e consequente baixa decomposição/alta humificação por microrganismos, à composição mineralógica do solo e ao não revolvimento do solo, que promovem maior agregação e proteção do COS.

O forte acúmulo de COS pode estar relacionado também com a composição mineralógica do solo, pois este mesmo é composto principalmente por gibbsita (Al(OH)<sub>3</sub>) que, segundo Barthès et al. (2008), promove maior agregação do solo e complexação do COS através da formação de complexos organominerais, devido principalmente à sua maior área superficial, quando comparado com sesquióxidos de ferro. Isso torna o COS pouco acessível aos microrganismos, o que diminui a taxa de decomposição do mesmo. O predomínio de Al<sup>3+</sup> no solo, tanto pela composição mineralógica do solo quanto pela absorção de cátions pelas plantas, aumentando a concentração Al<sup>3+</sup> no solo, pode também interferir na atividade microbiana por toxidez, promovendo a redução da decomposição do COS (ZECH et al., 1997).

Lima (2004), em estudo realizado na região Sudeste do Brasil, verificou que a temperatura é fator determinante no acúmulo de COS. De acordo com o autor, regiões de maiores altitudes e temperaturas mais amenas conduzem a uma menor taxa de decomposição do COS em comparação às regiões de menor

---

<sup>1</sup> A título de comparação, outro Argissolo vizinho sob mata primária contém um estoque de COS de 250 Mg ha<sup>-1</sup>, para a camada de 0-1 m (Zinn, Y. L.).

altitude e com maior temperatura média anual, o que é verificado no atual estudo, favorecendo o acúmulo de COS no solo.

A partição por tamanho de partículas do COS total está representada nas figuras 9 e 10. Na profundidade de 0-5 cm, não foram verificadas diferenças significativas de COP (COS na fração areia ou particulado - COP) para os usos do solo em relação à mata nativa. As diferenças significativas entre o solo sob as florestas plantadas para o COS associado à fração argila + silte apenas refletem em geral as diferenças notadas para teor total de COS, mostrando ser o COS associado, em sua grande maioria, à fração argila+silte (Tabela 12). Na profundidade de 10-20 cm, o COP sob florestas plantadas não diferiu daquele sob mata nativa, e o COS associado à argila+silte novamente reflete o teor total de COS da tabela 12.

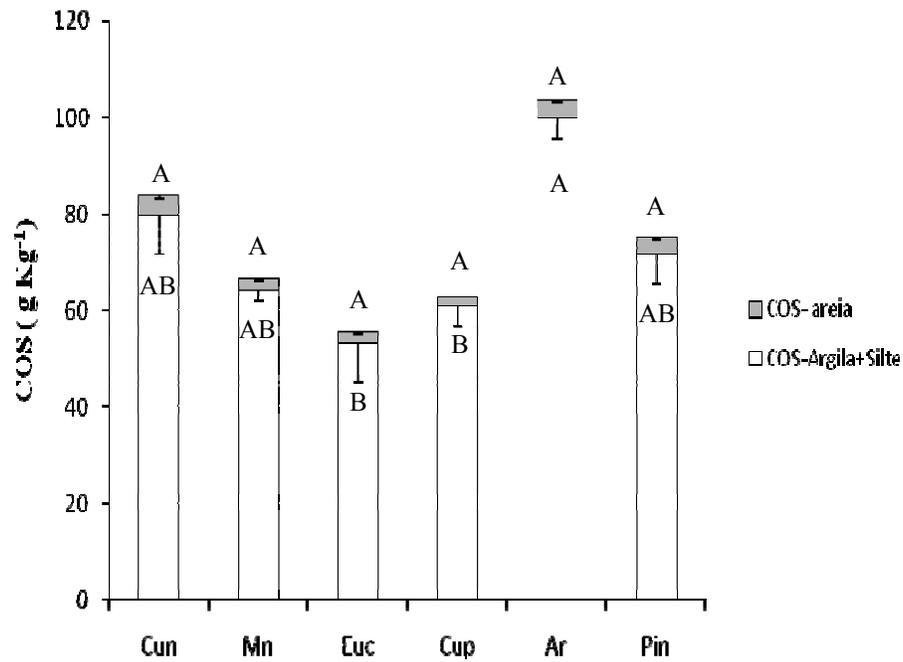


Figura 9 Distribuição do teor de COS total por fração de tamanho sob cunninghamia (Cun), mata nativa (Mn), eucalipto (Euc), cupressus (Cup), araucária (Ar) e pinus (pin) na camada de 0 a 5 cm. Barras representam o erro padrão da média. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer ( $p < 0,05$ )

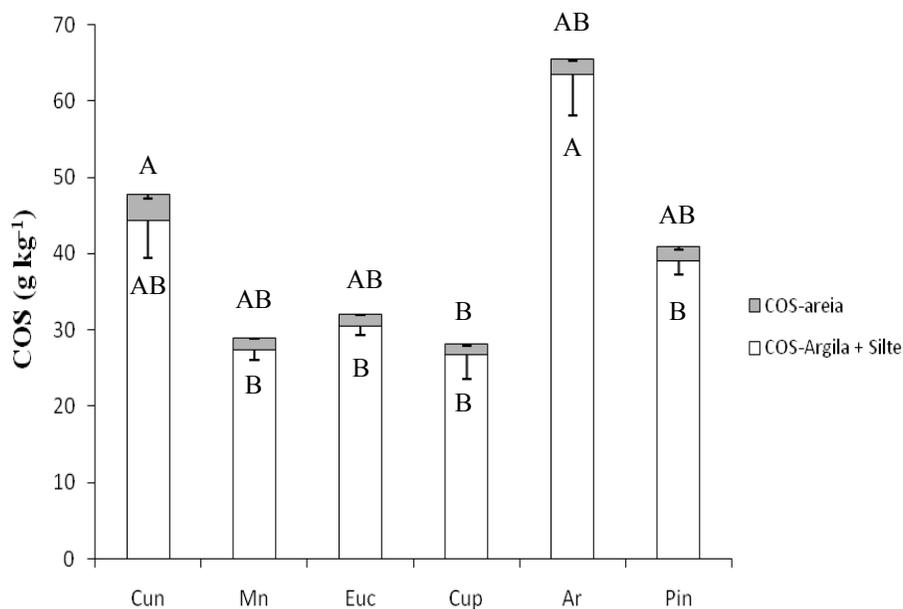


Figura 10 Distribuição do teor de COS total por fração de tamanho sob cunninghamia (Cun), mata nativa (Mn), eucalipto (Euc), cupressus (Cup), araucária (Ar) e pinus (pin) na camada de 10 a 20 cm. Barras representam o erro padrão da média. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer ( $p < 0,05$ )

A quantidade de COS associado à fração areia variou de 3 a 4,5% do COS na camada de 0-5 cm sob cupressus, cunninghamia e pinus respectivamente (Figura 11), e de 3,4 a 8% do COS para a camada de 10-20 cm sob araucária e cunninghamia, respectivamente (Figura 12). Foram observados maiores valores de COS associado à fração areia na camada de 10-20 cm, com exceção do solo sob araucária e pinus. Valores semelhantes foram observados por Rangel e Silva (2007), em estudo conduzido no campus da Universidade Federal de Lavras, atribuindo-se os baixos valores de COP à reduzida superfície

específica e densidade de carga superficial das areias, sendo esta fração pobre ou nula em complexos organominerais.

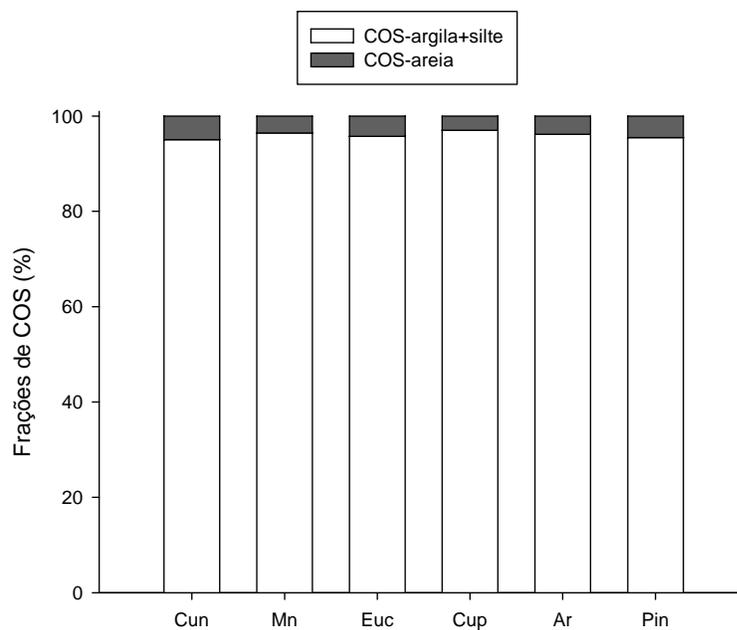


Figura 11 Distribuição percentual do COS nas frações areia e argila+ silte sob cunninghamia (Cun), mata nativa (Mn), eucalipto (Euc), cupressus (Cup), araucária (Ar) e pinus (pin) na profundidade 0 a 5 cm

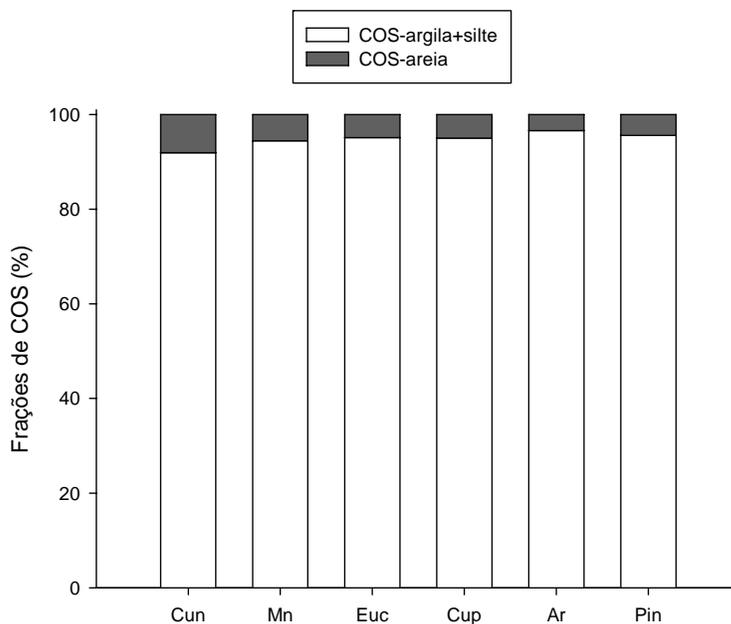


Figura 12 Distribuição percentual do COS nas frações areia e argila+ silte sob cunninghamia (Cun), mata nativa (Mn), eucalipto (Euc), cupressus (Cup), araucária (Ar) e pinus (pin) na profundidade 10 a 20 cm

O solo sob cunninghamia apresentou os maiores valores de COS associado à fração areia (Figura 11 e 12), possivelmente devido à menor porcentagem de argila, assim como observado por Zinn, Lal e Resck (2011) para solo de cerrado.

Os baixos valores de COS da fração areia em comparação com valores observados no Cerrado de 25-50% (ZINN et al., 2007 a, b; ZINN; LAL; RESCK, 2011), provavelmente são devido às altas taxas de ciclagem do COS neste ambiente de maior altitude, devido à alta bioturbação, resultando em humificação acelerada dos resíduos orgânicos (evidenciados nas figuras 8 C e 8 D) e em acúmulo de COS no solo. No Cerrado, a tendência à maior quantidade da fração COP pode refletir não somente a menor produção de resíduos no

ambiente savânico, mas também uma menor taxa de humificação e maior decomposição devido à estação seca mais prolongada. Segundo Salton et al. (2011), em sistemas com culturas anuais, o rendimento das culturas, as quantidades de resíduos e as condições climáticas são determinantes para a variação no estoque de COP. A fração mais lábil do COS, como o da fração areia ou particulado, é de suma importância, pois são fontes de C e nutrientes minerais mais prontamente disponíveis para os microrganismos responsáveis pela ciclagem dos nutrientes no sistema solo-planta (JANZEN et al., 1992).

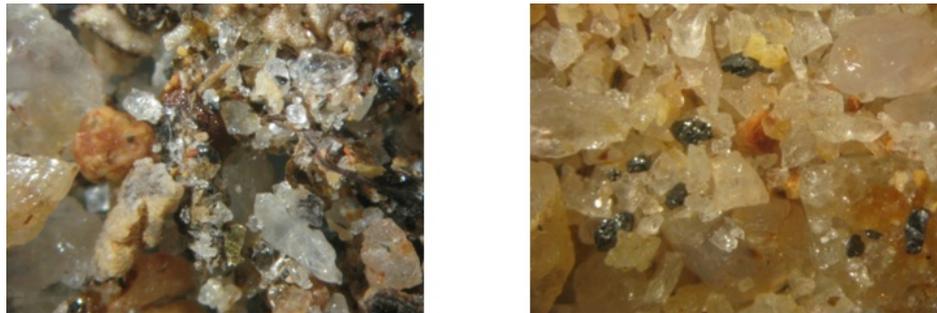


Figura 13 Foto em lupa com aumento de 10 vezes, mostrando a fração areia do solo sob mata nativa. Evidenciando o baixo teor de carbono orgânico do solo e alta concentração de grãos de quartzo angulares

## 8 CONCLUSÃO

O plantio de florestas em clima tropical de altitude no extremo Sul de Minas Gerais mostrou ser um sistema conservador da estrutura do solo. Apesar da baixa fertilidade do solo e moderada acidez, as florestas se desenvolvem satisfatoriamente, devido à busca de nutrientes em subsolo e ao grande aporte e ciclagem de serapilheira.

O teor e estoque de COS apresentam valores muito maiores que os reportados na literatura,  $103 \text{ g kg}^{-1}$  e  $202,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ , devido às condições climáticas favoráveis à produção florestal e desfavoráveis à decomposição, juntamente com a composição mineralógica que favorece o acúmulo de COS. O COS nesta região é composto principalmente por COS humificado, apresentando baixos valores de COS na fração areia, o que resulta em grande acidez titulável e CTC potencial.

O plantio de araucária resultou em sequestro de CO de  $50 \text{ Mg ha}^{-1}$  para a camada de 0-20 cm em relação à mata nativa, sendo recomendado o estudo em maiores profundidades. O conjunto de dados levantados sugere que o reflorestamento com espécies de ciclo curto e médio é um uso da terra altamente sustentável nas condições climáticas investigadas.

## REFERÊNCIAS

ALVAREZ V., V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. 359 p.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1099-1108, set./out. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Apresentação do anuário estatístico da ABRAF 2011: ano base 2010**. Brasília, 2011. 130 p.

ASSOCIAÇÃO DE HOTÉIS E Pousadas de Monte Verde. **Revista Divirta-se em Monte Verde**, Camanducaia, v. 2, p. 101, 2010.

BALIEIRO, F. C. et al. Dinâmica da serapilheira e transferência de nitrogênio ao solo, em plantios de *Pseudosamanea guachapele* e *Eucalyptus grandis*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 597-601, 2004.

BARTHÈS, G. B. et al. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, p. 14-25, 2008.

BAYER, C. et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 101-109, 2000.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 105-112, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 9-26.

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. **Australian Journal Agriculture Research**, Melbourne, v. 46, p. 1459-1466, 1995.

BLAIR, N. et al. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility. Part III. Tamworth crop rotation experiment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam. v. 91, p. 48-56, 2006.

BROWN, L. R. **Building a sustainable society**. New York: Norton, 1981. 48 p.

CALVERT, C. S. ; BUOL, S. W.; WEED, S. B. Mineralogical characteristics and transformation of a vertical rock-saprolite-soil sequence in the North Caroline Piedmont: profile morphology, chemical composition and mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 1096-1103, 1980.

CAMPOS, P. M. et al. Difractometria de raios-x aplicada na identificação de gibbsita e caulinita em Latossolos do Distrito Federal. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9., 2008, Brasília. **Anais...** Brasília: [s. n.], 2008. Disponível em: <<http://www.cpac.embrapa.br/download/376/t>>. Acesso em: 15 jan. 2012).

CANTARUTTI, R. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 769-850.

CAPRA, A. **Estimativa de biomassa e carbono no primeiro desbaste em uma floresta de Araucaria angustifolia (Bertoloni) Otto Kuntze, na região de Quedas do Iguaçu – PR**. 2001. 25 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Agricultura e aquecimento global. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 40-44, 2007.

CHAN, K. Y.; BOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture leys. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 61-67, 2001.

CLEMENTE, C. A.; AZEVEDO, A. C. Mineral weathering in acid saprolites from subtropical, Southern Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 64, n. 6, p. 601-607, 2007.

CONFERÊNCIA DE QUIOTO. **Protocolo de Quioto**. 1997. Disponível em: <<http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/Protocolo - Quioto.pdf>>. Acesso em: 2 jan. 2012).

CONTEH, A.; BLAIR, G. J. ; ROCHESTER, I. J. Soil organic carbon fractions in a Vertisol under irrigated cotton production as affected by burning and incorporating cotton stubble. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 36, p. 655-667, 1998.

COSTA, P. M.; SILVA, N.; AUKLAND, L. **Plantações e a mitigação de efeito estufa**: análise resumida. Rio de Janeiro: [s.n.], 2000. Disponível em: <<http://www.ecosecurities.com/300publications.htm>>. Acesso em: 5 jan. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 507-514, 1999.

FIALHO, R. C.; ZINN, Y. L. Changes in soil organic carbon under Eucalyptus plantations in Brazil: a comparative analysis. **Land Degradation & Development**, Chichester, 2012. (Artigo aceito e não publicado).

FREIXO, A. A. et al. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p. 221-230, 2002.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 2, p.193-207, 2002.

GATTO, A. **Estoques de carbono no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na Região Centro-Leste de Minas Gerais**. 2005. 159 p. Tese (Doutorado em Solo e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil**. 2º aproximação. Belo Horizonte: [s. n.], 1978. 66 p. (Série técnica, 11).

HEINECK, C. A. et al. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Convênio COMIG/CPRM, 2003. 1 Mapa. Escala 1:1.000.000.

INÁCIO, E. S. B. **Distribuição vertical de carbono orgânico em Latossolo sob diferentes usos**. 2009. 86 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

INDA JÚNIOR, A. V.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. Composição da fase sólida mineral do solo. In: MEURER, E. J. (Org.). **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. v. 1, p. 31-61.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 2 jan. 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996 p.

JACOMINE, P. K. T. et al. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife: Ministério da Agricultura/Sudene, 1973. v. 1, 359 p. (Boletim técnico, 26; Série Pedológica, 14).

JANZEN, H. H. et al. Light fraction organic matter in soils from long term crop rotations. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 56, p. 1799-1806, 1992.

KATO, E. et al. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Latossolo vermelho-amarelo do Cerrado, sob diferentes coberturas vegetais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 5, p. 732-738, set./ out. 2010.

KER, J. C.; RESENDE, M. Caracterização química e mineralógica de solos brunos subtropicais do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, p. 215-225, 1990.

KÖNIG, F. G. et al. Quantificação de carbono orgânico na serapilheira, sub-bosque e solo de uma floresta de *Pinus elliottii* Engelm. aos 36 anos em Santa Maria, RS. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., 2002, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRG, 2002. p. 73.

LAL, R. Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in global carbon pools. **Energy and Environmental Science**, London, v. 1, p. 86-100, 2008.

LIMA, A. M. N. **Estoques de carbono e frações da matéria orgânica do solo sob povoamentos de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG**. 2004. 120 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

LIMA, A. M. N. et al. Soil organic dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam v. 235, p. 219-231, 2006.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2. ed. São Paulo: USP, 1996. 301p.

LOUZADA, J. N. C.; SCHOEREDER, J. H.; DE MARCO, P. J. Litter decomposition in semideciduous forest and Eucalyptus spp. crop in Brazil: a comparison. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 94, p. 31-36, 1997.

MELLONI, R. et al. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2461-2470, 2008.

MIRANDA, C. C.; CANELLAS, L. P.; NASCIMENTO, M. T. Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de mata atlântica e em plantios abandonados de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 905-916, 2007.

NIMMO, J. R.; PERKINS, K. S. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society American Journal, 2002. p. 317-328.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, The Hague, v. 76, p. 319-337, 1984.

PASSOS, R. R. et al. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1119-1129, 2007.

PAUL, K. I. et al. Change in soil carbon following afforestation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 168, p. 241-257, 2002.

PILLON, C. N. et al. Carbono e nitrogênio de um Argissolo Vermelho sob floresta, pastagem e mata nativa. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 3, p. 447-453, 2011.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. V. D.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 575-585, 2010.

PORTUGAL, A. F. et al. Atributos químicos e físicos de um Cambissolo Háplico tb distrófico sob diferentes usos na Zona da Mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG v. 32, p. 249-258, 2008.

PORTUGAL, A. F. **Resiliência da estrutura em Argissolo sob diferentes usos, na Zona da Mata de Minas Gerais**. 2005. 87 p. Dissertação (Mestrado em Solo e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

POTAFÓS. **Encarte técnico**. 2003. ( Informações agronômicas, 104). Disponível em: <<http://www.ipni.org.com.br>>. Acesso em: 2 jan. 2012.

PULROLNIK, K. et al. Estoque de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 1125-1136, 2009.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1609-1623, 2007.

RESCK, D. V. S. et al. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 359-406.

RESENDE, M. et al. **Mineralogia de solos brasileiros**: interpretação e aplicação. Lavras: UFLA, 2005. 192 p.

RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RESENDE, M. **Pedologia**. Viçosa, MG: UFV, 1990. 100 p.

RICCI, M. S. F. **A importância da matéria orgânica para o cafeeiro**. 2006. Disponível em: <[http://www.cnpab.embrapa.br/publicacoes/artigos/mat\\_org\\_cafeeiro.html](http://www.cnpab.embrapa.br/publicacoes/artigos/mat_org_cafeeiro.html)>. Acesso em: 2 fev. 2012.

ROSA, M. E. C. et al. Formas de carbono em latossolo vermelho Eutroférico sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p. 911-923, 2003.

ROSCOE, R.; BODDEY, R. M.; SALTON, J. C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas**: modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 304 p.

RUIZ, H. A. Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: SBCS, 2005. 1 CD ROM.

SALTON, J. C. et al. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011.

SANTOS, G. A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2. ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654 p.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2005. 91 p.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT User's guide**: version 6. 4th ed. Cary, 1989.

SILVA, L. G. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 6, p. 613-620, 2009.

SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, p. 39-58, 2004.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 991 p.

STOOPS, G. **Guidelines for analysis and description of soil regolith thin sections**. Madison: Soil Science Society of America, 2003. 184 p.

SUZUKI, L. E. A. S. **Qualidade físico-hídrica de um argissolo sob floresta e pastagem no sul do Brasil**. 2008. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TAN, Z. X. et al. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. **Geoderma**, Amsterdam, v. 121, p. 187-195, 2004.

TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

VIEIRA, F. C. B. et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, p. 195-204, 2007.

VITAL, M. H. F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 28, p. 235-276, dez. 2007.

WANG, H. et al. Spatial and seasonal dynamics of surface soil carbon in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. **Ecological Modelling**, New York, v. 147, p.105-122, 2002.

WENDLING, B. et al. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005.

WILCKE, W.; LILIENFEIN, J. Soil carbon-13 natural abundance under native and managed vegetation in Brazil. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 68, p. 827-832, 2004.

YU, C. M. Caracterização e tipologia dos projetos de sequestro de carbono no Brasil. In: SANQUETTA, C. R. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s. n.], 2002. p. 59-87.

ZECH, W. et al. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 69-116, 1997.

ZINN, Y. L. et al. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: soil structure. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 71, p. 1215-1224, 2007a.

ZINN, Y. L. et al. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: texture and mineralogy. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 71, p. 1204-1214, 2007b.

ZINN, Y. L. et al. Perfis de carbono orgânico do solo em Minas Gerais: região Sul. REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29., 2010, Guarapari. **Anais...** Guarapari: SBCS, 2010. 1 CD ROM.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v. 84, p. 28–40, 2005.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Eucalypt plantation effects on organic carbon and aggregation of three different-textured soils in Brazil. **Soil Research**, Collingwood, v. 49, p. 614-624, 2011.

ZINN, Y. L.; RESCK, D. V. S.; SILVA, J. E. Soil organic carbon as affected by with Eucalyptus and Pinus in Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 166, p. 285-294, 2002.