

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
CAMPUS SÃO JOÃO EVANGELISTA
CARLOS HENRIQUE SOUTO AZEVEDO**

**CARBONO ORGÂNICO, ESTOQUE DE CARBONO E ATRIBUTOS DA
BIOMASSA MICROBIANA DE SOLO SOB FLORESTA, REGENERAÇÃO E
EUCALIPTO**

**SÃO JOÃO EVANGELISTA
2020**

CARLOS HENRIQUE SOUTO AZEVEDO

**CARBONO ORGÂNICO, ESTOQUE DE CARBONO E ATRIBUTOS DA
BIOMASSA MICROBIANA DE SOLO SOB FLORESTA, REGENERAÇÃO E
EUCALIPTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto federal de Minas
gerais – Campus São João Evangelista
como exigência parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Me. Alisson José Eufrásio de
Carvalho

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

A993c
2020 Azevedo, Carlos Henrique Souto.

Carbono orgânico, estoque de carbono e atributos da biomassa microbiana de solo sob floresta, regeneração e eucalipto. / Carlos Henrique Souto Azevedo. – 2020.
50fl.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista, 2020.

Orientador: Me. Alisson José Eufrásio de Carvalho.

1. Qualidade do solo. 2. Carbono microbiano. 3. Matéria orgânica. I. Azevedo, Carlos Henrique Souto. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista. III. Título.

CDD 631.8

Elaborada pela Biblioteca Professor Pedro Valério
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais.
Campus São João Evangelista.
Bibliotecária Responsável: Rejane Valéria Santos – CRB-6/2907

CARLOS HENRIQUE SOUTO AZEVEDO

**CARBONO ORGÂNICO, ESTOQUE DE CARBONO E ATRIBUTOS DA
BIOMASSA MICROBIANA DE SOLO SOB FLORESTA, REGENERAÇÃO E
EUCALIPTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto federal de Minas
gerais – Campus São João Evangelista
como exigência parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Florestal.

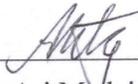
Orientador: Me. Alisson José Eufrásio de
Carvalho

Aprovada em 21 de janeiro de 2020.

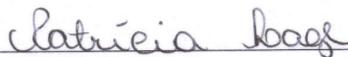
BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof. Me. Alisson José Eufrásio de Carvalho
Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista



Me. Ari Medeiros Braga Neto
Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista



Dra. Patrícia Lage
Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista

Aos meus pais Geralda e Geraldo, que me ensinaram os valores que uma pessoa de bem deve seguir.

Ao meu irmão Wesley, que é espelho e exemplo.

À minha sobrinha Geovana.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me ampara e me guia todos os dias da minha vida.

Aos meus pais e minha sobrinha Geovana, pelo amor, carinho, incentivo e apoio nas minhas escolhas.

Ao meu irmão Wesley, grande incentivador e amigo.

A minha namorada Sabrina, pelo companheirismo, amor, carinho e apoio.

Ao professor Alisson José Eufrásio de Carvalho pela amizade, conselhos, prestatividade e acima de tudo por ser um motivador e servir como inspiração como pesquisador e profissional.

Ao meu amigo Álisson (ipê) pelo apoio de sempre nas coletas de dados e monitoramento do experimento.

À Leidiane, pela amizade, companheirismo e momentos compartilhados no campus.

À Rosiane “vizinha de laboratório” pelo companheirismo e amizade.

Aos colegas e amigos Aparecida (Cidinha), Júnior Vítor (Vitinho), Fernanda (xuxu), Sarah, Luilla, Larissa Nara, Karine (Kaká), Guilherme, Rafaela, Yago (Lúcião) que em alguma etapa me auxiliou na execução deste estudo.

Aos amigos Lucas (Lucarelli) e Ricardo (Mestrão) pela ajuda nas análises laboratoriais e acima de tudo pelos momentos de descontração e amizade que tornaram o trabalho menos árduo.

Aos professores Adeliton, Fernanda Fazion e Marcelo Filardi pela ajuda nas análises de laboratório e pelos momentos de descontração.

Ao professor Ivan, pelo incentivo e ensinamentos durante o curso.

Ao Sr. Edson pela amizade durante os dois últimos anos.

À Beatriz e Sônia pelo zelo, cuidado e companheirismo.

Ao Instituto federal de Minas Gerais pela oportunidade e pelos conhecimentos adquiridos ao longo de todos esses anos.

A todos que de alguma maneira contribuíram para esta conquista.

“Bendito seja o Senhor, minha rocha, que
adestra as minhas mãos para a peleja e os
meus dedos para a guerra”

Salmos 144:1

“Nós viemos da terra, viemos do solo. É ele
que nos alimenta, nos mantém vivos e cuida
de nós. Somos natureza”.

Satish Kumar

RESUMO

As modificações do carbono do solo, da biomassa e a atividade microbiana têm sido apontadas como indicadores adequados de alterações provocadas por diferentes sistemas de uso e manejo do solo. Neste contexto, objetivou-se avaliar as alterações no carbono, a biomassa e a atividade microbiana de um Latossolo Vermelho-Amarelo, sob floresta estacional semidecidual e diferentes coberturas vegetais em São João Evangelista, MG. As coberturas vegetais estudadas foram: cultivo convencional de eucalipto (EC), regeneração natural (RN) e mata nativa (MN) como referência. Foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0-0,05 m, analisados o carbono orgânico total (COT), carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal (RBS) e calculados o estoque de carbono no solo (ECS), quociente metabólico (qCO_2) e a relação CBM / COT ($qMic$). A mata nativa apresenta maior influência na composição da matéria orgânica do solo do que o eucalipto e a regeneração. O reflorestamento com eucalipto e a regeneração mantiveram os estoques de C orgânico na camada do solo em níveis equivalentes aos de mata nativa. O plantio de eucalipto proporcionou os maiores teores de carbono da biomassa microbiana, indicando maior estabilidade do sistema. A mata nativa, o eucalipto e a regeneração não apresentam diferenças na taxa respiratórias dos microrganismos no solo e no quociente metabólico (qCO_2). O quociente microbiano (relação CBM / COT) indicou que no plantio de eucalipto a microbiota está sob menor fator de estresse.

Palavras-Chave: Qualidade do solo. Carbono microbiano. Matéria orgânica.

ABSTRACT

Changes in soil carbon, biomass and microbial activity have been suggested as appropriate indicators of changes caused by different land use and management systems. In this context, the present study aims to evaluate alterations in carbon, biomass and microbial activity of a dystrophic Red-Yellow Latossol, under Semideciduous Seasonal Forest and different vegetal coverings in São João Evangelista, state of Minas Gerais. The evaluate vegetal coverings were: conventional tillage with Eucalyptus (EC); natural regeneration (RN); and natural forest (MN) as reference. Soil samples were collected in the layer 0-0,05 m. The total organic carbon (COT), microbial biomass carbon (CBM), basal respiration (RBS) were analyzed, and the soil carbon stock (ECS), metabolic quotient (qCO_2) and CBM / COT ($qMic$) rate calculated. Native forest has a greater influence on soil organic matter composition than eucalyptus and regeneration. Eucalyptus reforestation and regeneration kept soil organic C stocks at levels equivalent to those of native forest. Eucalyptus planting provided the highest carbon content of microbial biomass, indicating greater system stability. Native forest, eucalyptus and regeneration showed no differences in respiratory rate of soil microorganisms and metabolic quotient (qCO_2). The microbial quotient (CBM / COT ratio) indicated that in eucalyptus planting the microbiota is under lower stress factor.

Keywords: Soil quality. Microbial carbon. Organic matter.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Precipitação (mm) e temperatura média (°C) no município de São João Evangelista - MG para o ano de 2018. 20
- Figura 2 – Disposição das áreas de na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG. 21
- Figura 3 – A) Imagem aérea da área de mata nativa. B) Ponto de coleta das amostras no interior da mata nativa. 22
- Figura 4 – A) Área de regeneração cultivada com lavoura de café em 2010. B) Área de regeneração em 2016, dois anos após a remoção da lavoura de café. C) área de regeneração em 2017. D) área de regeneração em 2018 quando foi realizada a coleta das amostras. 23
- Figura 5 – Teores de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG. As barras verticais representam o erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 31
- Figura 6 – Estoques de carbono do solo (ECS) na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG. As barras verticais representam o erro padrão. ns: não significativo..... 34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria, densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp) e classe textural do solo na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG..... 29

Tabela 2 – Atributos químicos do solo na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG. 30

Tabela 3 – Atributos microbiológicos do solo na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG. . 36

LISTA DE ABREVIATURAS

CO₂eq – Dióxido de carbono equivalente

CO₂ – Dióxido de carbono

t – Tonelada

C – Carbono

MOS – Matéria orgânica do solo

BMS – Biomassa microbiana do solo

COS – Carbono orgânico do solo

ECS – Estoque de carbono no solo

COT – Carbono orgânico total

N – Nitrogênio

CTC – Capacidade de troca catiônica

P – Fósforo

RBS – Respiração basal do solo

MN – Mata nativa

RN – Regeneração

EC – Plantio de eucalipto

S – Sul

O – Oeste

IFMG-SJE – Instituto Federal de Minas Gerais Campus São João Evangelista

P₂O₅ – Óxido de fósforo

K – Potássio

KCl – Cloreto de potássio

B – Boro

TFSA – Terra fina seca ao ar

CBM – Carbono da biomassa microbiana

$K_2Cr_2O_7$ – Dicromato de potássio

Ds – Densidade do solo

C-CO₂ – Carbono mineralizável

NaOH – Hidróxido de sódio

Na₂CO₃ – Carbonato de sódio

BaCl₂ – Cloreto de bário

HCl – Ácido clorídrico

H₂SO₄ – Ácido sulfúrico

H₃PO₄ – Ácido fosfórico

q_{Mic} – Quociente microbiano

q_{CO_2} – Quociente metabólico

Mg – Megagrama

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	CARBONO ORGÂNICO NO SOLO	15
2.2	MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS AVALIADAS NO ESTUDO.....	20
3.2	AMOSTRAGEM E PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS DE SOLOS	23
3.3	ANÁLISES LABORATORIAIS DO SOLO	24
3.3.1	Análises físicas e químicas	24
3.3.2	Carbono orgânico total e estoque de C	24
3.3.3	Respiração basal de CO₂ (Emissão de CO₂).....	25
3.3.4	Carbono da Biomassa Microbiana.....	26
3.4	ÍNDICES	27
3.4.1	Quociente Metabólico (<i>q</i>CO₂).....	28
3.4.2	Quociente Microbiano (<i>q</i>Mic)	28
3.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5	CONCLUSÃO.....	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Apenas 3,38 % das emissões mundiais (aproximadamente, 1.203 milhões de t de CO₂eq em 2012) são oriundas do Brasil (VITAL, 2018). Considerando a quantidade de CO₂ emitido pelas atividades industriais, o Brasil apresenta baixa contribuição comparado aos países desenvolvidos, entretanto, no país, as emissões relacionadas ao uso da terra são substanciais, sendo o desmatamento e o preparo intensivo do solo para fins agrícolas os principais contribuintes para essas emissões (LIMA et al., 2006).

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, quanto ao uso do solo, as emissões vêm se expandindo, no mundo, pelas seguintes grandes frentes: produção de grãos para alimentação, criação intensiva e extensiva de gado e biocombustíveis; e alterações por desmatamento e queimadas, em especial, na África e em florestas tropicais, como é o caso da Amazônia brasileira (IPCC, 2014).

No Brasil, entre 1990 e 2015 as emissões de CO₂ passaram de 1,62 para 1,93 x 10⁹ t de CO₂, um aumento de aproximadamente 15 %, destacando o uso da terra, que em 2015 foi responsável por 46 % das emissões, seguido pelo setor de energia, que emitiu 23,6 %, e em terceiro lugar a agricultura, com 22,1 % das emissões totais (AZEVEDO et al., 2018).

A biota terrestre (biomassa vegetal e animal) armazena cerca de 560 Gt de C (LAL, 2004), por sua vez, o solo é considerado o segundo maior reservatório de C no planeta, armazenando cerca de 2.334 x 10⁹ t de C nos 3 m superiores, enquanto os oceanos armazenam 38.400 x 10⁹ t de C (NÓBREGA et al., 2015). Dessa maneira, existe a necessidade de um enfoque em estudos de reservatórios de C nos solos, segundo Jobbágy e Jackson (2000) a nossa capacidade de prever e mitigar as consequências das mudanças climáticas e de cobertura do planeta, depende, em parte, em uma descrição clara das distribuições e controle de entrada e saída de carbono orgânico do solo.

Segundo Malavolta (1987), a remoção da floresta para exploração agrícola provoca ruptura nos ciclos do carbono e dos nutrientes, os quais operam graças à entrada fotossintética do CO₂ e à decomposição acelerada e contínua da matéria orgânica do solo (MOS), realizada pelos microrganismos, uma vez alteradas a qualidade e quantidade da MOS, a atividade da biomassa microbiana é diretamente afetada.

A biomassa microbiana do solo (BMS) é recomendada como indicador biológico da qualidade da MOS visando avaliar a sustentabilidade de sistemas de produção

(MELE e CARTER,1993). A BMS representa a maior parte da fração ativa da matéria orgânica, dessa maneira representa um atributo mais sensível quando comparado ao carbono orgânico do solo (COS) e ao nitrogênio total na aferição de mudanças nos teores e na qualidade da MOS do solo decorrentes de manejo e práticas de cultivo (GAMA-RODRIGUES, 1999). Diversos trabalhos demonstram que os atributos microbiológicos são categóricos para indicar a qualidade do solo em diferentes ecossistemas e condições edafoclimáticas (NAVROSKI et al., 2007).

Considerando a importância do tema, através do presente estudo objetivou-se estimar os teores de carbono orgânico total, o estoque de carbono no solo e avaliar os atributos microbianos do solo sob coberturas vegetais de mata nativa, plantio de eucalipto e regeneração natural em São João Evangelista-MG.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CARBONO ORGÂNICO NO SOLO

Considerando o solo como o segundo maior reservatório de C do planeta, estudos recentes sobre sua dinâmica ganharam visibilidade (NÓBREGA et al., 2015). O solo é um sistema aberto, em fluxo constante de matéria e energia com o ambiente, por consequência, alterações no microclima, na quantidade e qualidade do C em circulação no sistema influenciam na taxa de decomposição do carbono orgânico do solo (COS), que por sua vez controla diretamente o estoque de carbono no solo (ECS), sendo assim, o uso da terra exerce influência direta nas concentrações, qualidade e vias de C no sistema. (PRIMIERY; MUNIZ; LISBOA, 2017).

Dado a relevante importância do C, estudos envolvendo a emissão de C em regiões congeladas tem ganhado destaque devido à fragilidade destes ecossistemas e sua maior susceptibilidade as alterações climáticas permitindo criar previsões a respeito dos efeitos possíveis do aquecimento global em outras regiões do mundo. La Scala Júnior et al. (2010) objetivando avaliar os efeitos das emissões de CO₂ em solos da Antártica, obtiveram resultados que permitem inferir que mudanças nas emissões de CO₂ são controladas pelo aumento da temperatura do solo. Firme Sá et al. (2019) avaliando a emissão de gases em solos florestais e sob tundra na Patagônia afirmam que o aumento da temperatura global pode favorecer a liberação de gases de efeito estufa para atmosfera.

Estudos acerca das modificações do carbono do solo devido as alterações de uso da terra permitem a criação de estratégias que atenuem os riscos de impactos negativos no futuro (SANTOS et al., 2019). Os autores observaram maiores teores de carbono orgânico total (COT) nas camadas mais superficiais do solo sob vários usos, com redução à medida que a profundidade aumenta, ressaltando que o maior gradiente de COT entre as camadas ocorreu em área de floresta nativa, com grande acumulação superficial.

O carbono ocorre no solo na forma tanto orgânica como inorgânica, grande maioria é encontrada na matéria orgânica e em minerais carbonatos, predominando sua forma orgânica, em regiões de clima muito úmido, onde os perfis são submetidos a intensa lixiviação (CAMARGO et al., 2009). A emissão de CO₂ do solo para a atmosfera ocorre principalmente por dois processos biológicos: a decomposição de

resíduos orgânicos e a respiração (microrganismos e sistema radicular das plantas) (CAMARGO et al., 2010).

As principais vias de entrada de C no solo são o aporte de biomassa da parte aérea e de raízes das plantas, liberação de exsudados radiculares, lavagem de constituintes solúveis das plantas, bem como, a transformação desses materiais carbonados pelos macro e microrganismos do solo, mecanismos estes que compõem a biosfera (SILVA e MENDONÇA, 2007).

A capacidade de retenção e armazenamento de carbono pelas florestas é de tal forma importante para o ciclo global do carbono, que foram consideradas pelo Protocolo de Quioto como sumidouros de carbono e podem ser contabilizadas para cumprir as metas estabelecidas para retardar os efeitos do aquecimento global (GONÇALVES; FONSECA; FIGUEIREDO, 2013).

O desmatamento para extração de madeira e queimadas das florestas tropicas para plantio agrícola e de pastagens é um grande responsável pelo crescente aumento de CO₂ na atmosfera (D'ANDRÉA et al., 2004). Considerando que as florestas contêm de 20 a 100 vezes mais carbono por unidade de área que as plantações ou pastos, a maior parte do carbono originalmente contido na vegetação natural e nos solos após a conversão das áreas é liberada para a atmosfera em forma de CO₂, somente uma quantidade relativamente pequena de carbono é redistribuída na terra ou levada pelos rios (PACHECO e HELENE, 1990).

Devido ao dinamismo e sensibilidade da MOS, a adoção de práticas como a queima, fertilização mineral, intervenções frequentes e preparo intensivo do solo, podem ser extremamente nocivas, podendo mineralizar a matéria orgânica e emitir grandes quantidades de gases de efeito estufa para a atmosfera (SOUZA; PREZOTTI; GUARÇONI M., 2012). Os autores, ressaltam o grau de importância que manejos ecológicos por meio de cultivos consorciados com floresta e sistemas agroecológicos representam para o planeta atualmente, considerando o ciclo global do carbono. A compreensão dos fenômenos de trocas de carbono entre solo, água e atmosfera é essencial para o manejo e a conservação de ecossistemas naturais e agrários (BALDOTTO et al., 2015).

As menores perdas de carbono atribuídas às florestas primárias se devem, entre outros atributos, ao menor quociente metabólico (relação entre a respiração do solo e o carbono da biomassa) e maior relação C/N da biomassa observados em solos sob estas coberturas vegetais (MOREIRA e MALAVOLTA, 2004).

O cultivo de florestas, principalmente nas regiões tropicais, tem sido apontado como meio eficiente no sequestro de C em razão da acumulação deste na madeira e aumento do estoque no solo, porém, as informações acerca da efetividade dos plantios florestais no sequestro de CO₂ atmosférico, bem como o seu período de manutenção no ecossistema ainda são incipientes (PULROLNIK et al., 2009). A quantidade de carbono adicionada está relacionada com o tipo de cultura e espécies utilizadas (PRIMIERY; MUNIZ; LISBOA, 2017). O plantio de espécies florestais com sistema radicular maior concorre diretamente para o incremento na alocação de grande quantidade de C orgânico no solo, o qual permaneceria estocado por período relativamente longo no solo, quando comparado ao C orgânico estocado na biomassa (GATTO et al., 2010).

Pegoraro et al. (2011) avaliando plantios de eucalipto em áreas anteriormente ocupadas por pastagem observaram que a floresta plantada pode causar mudanças no estoque de C e N no solo e, possivelmente, alterar a qualidade da MOS.

Jesus et al. (2015) avaliando estoques de COT em São João Evangelista-MG concluíram que a remoção de resíduo da colheita de eucalipto (particularmente casca) promove a redução do COT e de frações mais lábeis de C do solo, evidenciando que a maior entrada de C no sistema leva a maiores teores de matéria orgânica do solo nesse caso.

O COT apresenta correlação com vários atributos físicos e químicos do solo, entre eles a textura, o grau e a frequência de saturação por água, e a fertilidade propriamente dita, tendo sido observado altos teores de COT em perfis com estes atributos estáveis, em contrapartida, em áreas submetidas à drenagem natural ou artificial e à utilização mais intensiva, foram observados decréscimo nos teores de COT, mostrando alterações relacionadas à atividade antrópica (NASCIMENTO et al., 2010). De acordo com Bocuti et al. (2019) o carbono orgânico e os óxidos de ferro atuam como agentes cimentantes no processo de formação de agregados, conferindo ao solo maior estabilidade, proporcionando resistência aos impactos das gotas de chuva, reduzindo o carreamento de partículas pelo escoamento superficial.

2.2 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

A matéria orgânica também é um componente essencial quando se refere à manutenção da qualidade do solo, desempenhando funções específicas e estando envolvida em diversos processos físicos, químicos e biológicos, dessa maneira,

irregularidades no seu suprimento e alterações nas suas taxas de decomposição podem provocar a sua redução em solos cultivados, contribuindo para processos de degradação dos solos (CUNHA NETO et al., 2018). As concentrações de características da MOS resultam das suas taxas de produção, alteração e decomposição de resíduos orgânicos, que por sua vez dependem de uma série de fatores, como temperatura, aeração, pH e disponibilidade de água e nutrientes, sendo diversos destes condicionados pelo uso e manejo dos solos (NASCIMENTO et al., 2010).

O uso e manejo inadequado do solo, além de concorrer com o acréscimo na emissão de gases do efeito estufa, impactando negativamente a atmosfera, ainda trazem inúmeros problemas relacionados à sua sustentabilidade em razão da degradação da MOS, alterando negativamente os seus atributos físicos e químicos, bem como sua biodiversidade (COSTA et al., 2015).

A MOS em sistemas tropicais é um componente de extrema importância, já que esses solos possuem avançado grau de intemperismo e baixa fertilidade natural (SILVA e MENDONÇA, 2007). A matéria orgânica apresenta grupos funcionais eletricamente carregados na sua constituição que aumentam a CTC e diminuem a adsorção específica de P, além da capacidade de disponibilizar nutrientes e de complexar íons alumínio, reduzindo sua toxicidade (BALDOTTO et al., 2015).

Dessa maneira, a produtividade dos ecossistemas naturais e de agrossistemas introduzidos e raramente fertilizados, depende da reciclagem dos nutrientes minerais contidos na serapilheira das plantas e da MOS (MOREIRA e MALAVOLTA, 2004). A manutenção da atividade da biomassa microbiana em solos perturbados exige maiores concentrações de C (SILVA et al., 2018).

De acordo com Hugar (2017), a decomposição contínua da MOS em terras cultivadas de regiões áridas e semiáridas pode levar à degradação do solo, devido a incapacidade de se assegurar a sustentabilidade da produção.

A avaliação da qualidade por meio de atributos do solo é bastante complexa devido à ampla quantidade de definições de um solo com qualidade para determinado uso, à multiplicidade de inter-relações entre fatores físicos, químicos e biológicos que regulam os processos e aos aspectos relacionados à sua variação temporal e espacial (MELLONI et al., 2008).

Os atributos da biomassa microbiana surgem como boa opção como parâmetro de qualidade do solo. A biomassa microbiana do solo (BMS) é o componente vivo da MOS, composta por bactérias, fungos e actinomicetos responsáveis pela ciclagem de

nutrientes (REIS et al., 2019). De acordo com Silva e Mendonça (2007), a BMS atua na decomposição de resíduos vegetais e como compartimento de reserva lábil de C e nutrientes e no fluxo de energia do solo, cerca de 1 a 3 % do COT em solos tropicais está associado a BMS. Segundo os autores a tendência é que em camadas mais superficiais pela maior disponibilidade de matéria orgânica, água e outros nutrientes a BMS também seja maior.

As bactérias e os fungos são os principais responsáveis pela maior liberação de CO₂ via degradação da matéria orgânica, cuja atividade somada a todas as funções metabólicas nas quais o CO₂ é produzido denomina-se respiração basal do solo (RBS), que por sua vez, possui uma estreita relação com as condições abióticas do solo, entre elas a umidade, temperatura e aeração (SILVA; AZEVEDO; DE-POLLI, 2007). Desse modo, a atividade da biomassa microbiana apresenta correlação com a temperatura e umidade, sendo observadas maiores atividades nos períodos de boa disponibilidade de água e temperaturas amenas, em contrapartida, períodos secos com temperaturas elevadas reduzem sua atividade (MAIA et al., 2019).

Moreira e Costa (2004) avaliando a abertura de clareiras na floresta amazônica observaram que a atividade da biomassa microbiana aumentou 85 % no período de um ano após o distúrbio, atingindo à metade do valor encontrado na floresta primária, porém, este incremento permaneceu estável até o reflorestamento com 10 anos de idade, evidenciando o efeito negativo do desmatamento na atividade da BMS.

Estudos demonstram o potencial do uso da cobertura vegetal na mitigação dos efeitos deletérios dos processos de preparo do solo para do plantio, conferindo maior estabilidade na atividade microbiana em comparação com solo descoberto, no qual os microrganismos são mais suscetíveis ao estresse ambiental (SILVA et al., 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS AVALIADAS NO ESTUDO

O presente estudo foi realizado no campus do Instituto Federal de Minas Gerais, localizado em São João Evangelista – MG (IFMG-SJE), latitude 18°30' S, longitude 42°45' O, município que compõe a microrregião denominada mar de morros, médio do Rio Doce - Minas Gerais, considerada como importante polo florestal, onde se concentram extensos plantios comerciais de eucalipto (BRAGA et al., 1999). O clima da região é predominantemente Cwa, temperado chuvoso-mesotérmico, caracterizado pelo inverno seco e verão chuvoso, segundo a classificação proposta por Köppen (1936). A precipitação acumulada registrada no período de janeiro de 2018 a dezembro de 2018 foi de 1236 mm, concentrada entre os meses de janeiro a março (61%) e no período de setembro a dezembro (34%) (Figura 1).

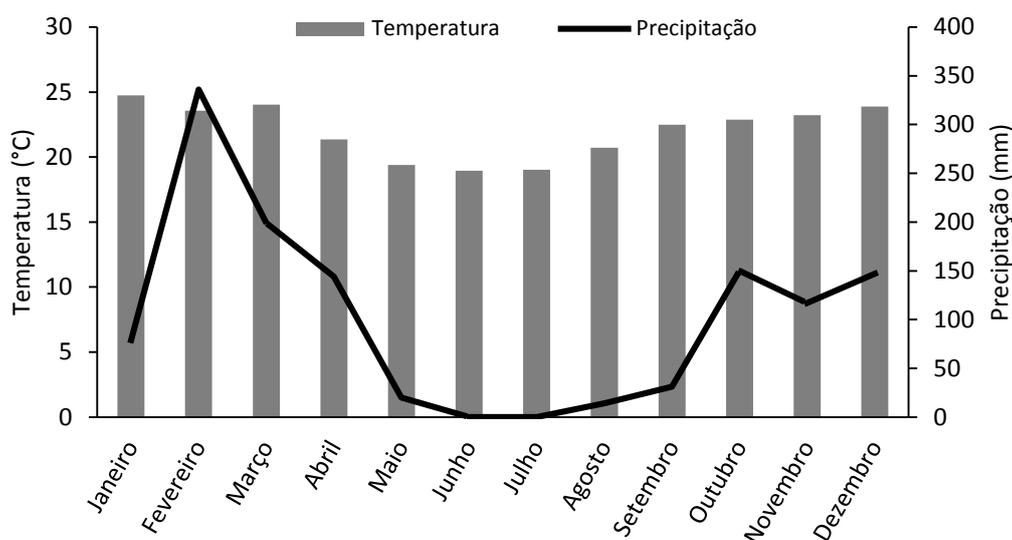


Figura 1 - Precipitação (mm) e temperatura média (°C) no município de São João Evangelista - MG para o ano de 2018.

Fonte: Precipitação: Pluviômetro Sítio Tataíra. Temperatura: Estimada pelo INMET (2018).

A região é considerada uma área de abrangência do bioma Mata Atlântica (GONÇALVES et al. 2014), em que predominam os solos da classe Latossolo Vermelho - Amarelo distrófico ou álico de textura média a argilosa.

As coberturas vegetais estudadas estão localizadas em área composta Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, segundo observações de campo e mapa de solos de

Minas Gerais (FEAM, 2010). As três diferentes coberturas vegetais estudadas consistiram em um fragmento de mata nativa (MN), regeneração (RN) e plantio comercial de eucalipto (EC) (Figura 2). As áreas de regeneração e de plantio de eucalipto são vizinhas e ficam aproximadamente a 700 m de distância da mata nativa.



Figura 2 – Disposição das áreas de na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG.

Fonte: Google Earth Pro (2018).

De maneira geral, a vegetação que compõe a mata nativa apresenta característica das formações de Floresta Estacional Semidecidual de Mata Atlântica (GASPAR et al., 2014). Ecologicamente, a ocorrência desta tipologia florestal está condicionada a estacionalidade climática, período seco e período chuvoso, que por sua vez determinam o caráter semidecidual dos indivíduos arbóreos dominantes, na qual se observa repouso fisiológico e queda foliar parcial desencadeado pelo frio e déficit hídrico, em 20 a 50 % das árvores que compõem a floresta (IBGE, 2012). As famílias mais representativas encontradas em fragmento de mata na região são Annonaceae, Apocynaceae, Bignoniaceae, Fabaceae-Caesalpinioideae, Fabaceae - Faboideae, Fabaceae - Mimosoideae, Lauraceae, Meliaceae, Myrtaceae e Rubiaceae (GASPAR et al., 2014; GONÇALVES et al., 2010). De acordo com o IBGE (2012) neste tipo de floresta predominam gêneros amazônicos de distribuição brasileira, como, por exemplo: *Astronium* (gonçalo-alves); *Cariniana* (jequitibás); *Handroanthus* (ipês); *Lecythis* (sapucaia); *Parapiptadenia* (angicos); *Peltophorum* (canafístula); e outros fisionomicamente menos relevantes.

O fragmento de aproximadamente 130 ha de mata nativa (MN) (Figura 3) escolhido, consiste de uma área de Reserva Legal averbada, localizada nas coordenadas 18° 32' 43.47" S; 42° 45' 16.13" O, com altitude entre 692 a 775 m. Essa área foi escolhida como referência por se tratar de um sistema atualmente em equilíbrio, tendo iniciado o processo de regeneração a mais de 50 anos, após a aquisição da fazenda pelo IFMG-SJE. Anteriormente a área sofreu intervenção antrópica, submetida ao corte raso objetivando a extração de madeira para venda e uso local, convertendo-se posteriormente a área desmatada em pastagem, sendo este o último relato de intervenção.

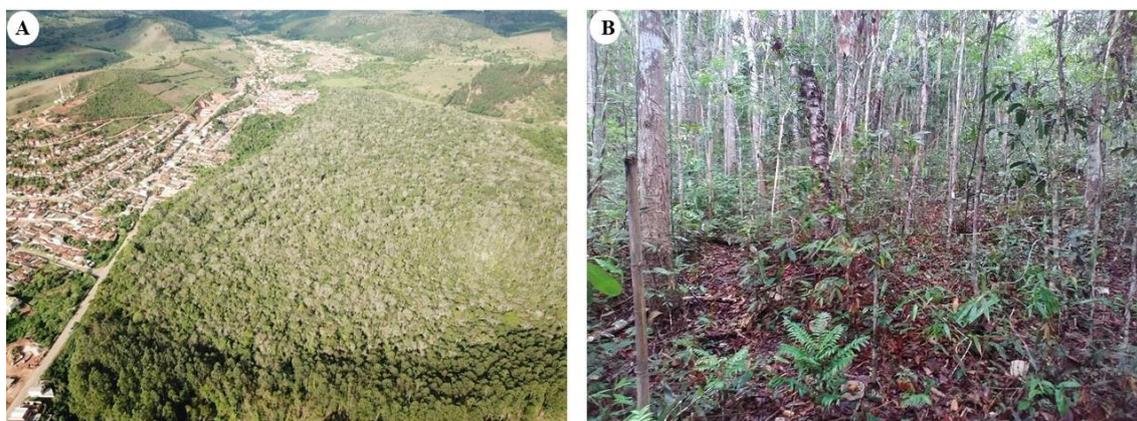


Figura 3 – A) Imagem aérea da área de mata nativa. B) Ponto de coleta das amostras no interior da mata nativa.

Fonte: A) Drone Mavic Pro (Fonseca, 2018). B) O autor.

O cultivo de eucalipto (EC) (*urograndis*) consiste de um plantio clonal de híbrido de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake \times *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e localiza-se nas coordenadas 18° 33' 17" S; 42° 45' 46" O e altitude entre 726 a 795 m. Foi implantado em 2005, em uma área de 8,6 ha, anteriormente ocupada por pastagem. A floresta é conduzida no espaçamento de 3,0 x 3,0 metros entre linhas e entre plantas, totalizando densidade de aproximadamente 1.111 plantas ha⁻¹. No preparo do solo não foi realizada correção de acidez, somente a aplicação de 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em filete contínuo no sulco de subsolagem. Realizou-se adubação de plantio aplicando-se 100 g por cova de formulado NPK (6-30-6) e adubação de cobertura utilizando-se 300 g planta⁻¹ de KCl+B. O controle preventivo de pragas foi realizado tratando as mudas com cupinicida, 20 g ha⁻¹ e distribuindo-se 10 kg ha⁻¹ de isca formicida granulada.

A área de regeneração (RN) (Figura 4) localiza-se nas coordenadas 18° 33' 03" S; 42° 45' 51" O e altitude de 713 a 748 m, em que foi iniciado o processo de restauração há quatro anos, que consistiu no plantio de espécies pioneiras e secundárias

tardias de valor ecológico como *Schizolobium parahyba* (guapuruvu), *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex A. DC.) Mattos, *Handroanthus serratifolius* (Vahl) (ipê-amarelo) e espécies de ocorrência natural no bioma Mata Atlântica. As mudas foram produzidas no viveiro de produção de mudas do IFMG-SJE. A área de 2,3 ha, após a remoção da vegetação nativa (mata) foi ocupada por pastagem, e posteriormente ocupada com plantio de café (*Coffea arabica*), que por sua vez foi cultivado durante 20 anos até a sua remoção para regeneração. Nestes primeiros estágios de regeneração, observa-se a infestação por gramíneas na área, que emergiram após a interrupção das práticas de controle de plantas daninhas que eram realizadas na lavoura de café com roçada manual e aplicação de herbicidas.

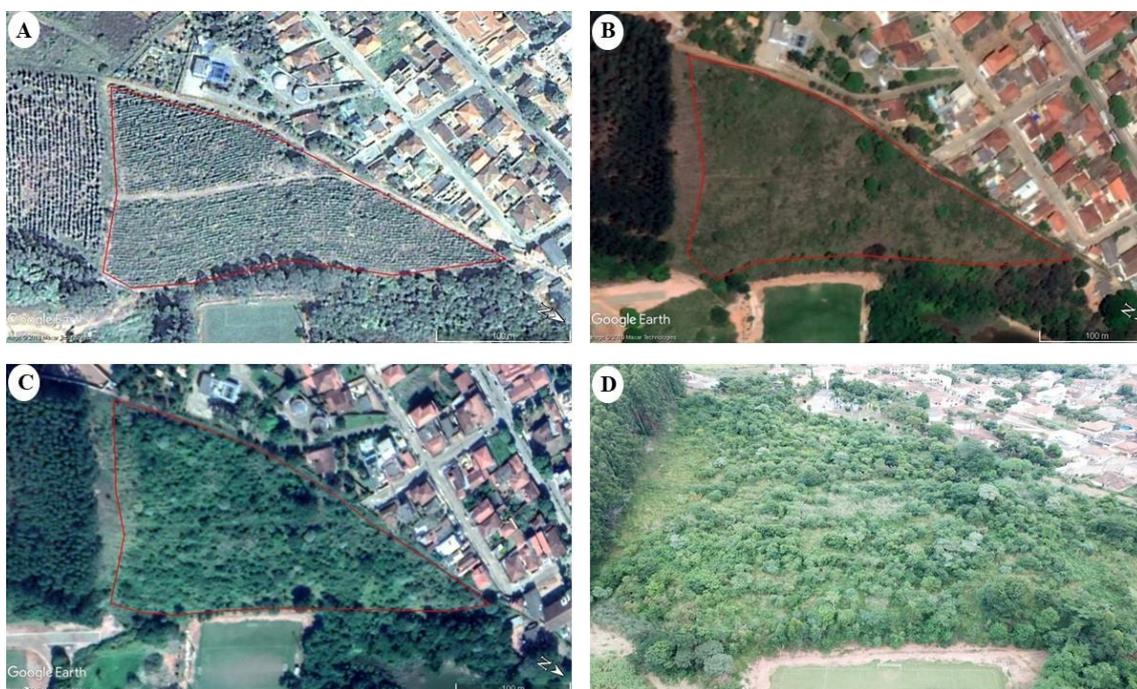


Figura 4 – A) Área de regeneração cultivada com lavoura de café em 2010. B) Área de regeneração em 2016, dois anos após a remoção da lavoura de café. C) área de regeneração em 2017. D) área de regeneração em 2018 quando foi realizada a coleta das amostras.

Fonte: A, B e C - Google Earth Pro (2018). D - Drone Mavic Pro (Fonseca, 2018).

3.2 AMOSTRAGEM E PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS DE SOLOS

Foram coletadas amostras de solo em triplicatas, nas três áreas em estudo (MN, RN e EC), na profundidade de 0-0,05 m no mês de novembro de 2018 no período da manhã entre 08 e 10 horas. Na área de EC, a coleta de solo foi realizada na entrelinha de plantio.

As amostras foram retiradas por meio da abertura de pequenas trincheiras de 0,1 m de profundidade. Com auxílio de uma faca foram coletadas quatro sub-amostras para

compor uma amostra deformada por unidade amostral. Para determinação da densidade do solo foram coletadas três amostras indeformadas de solo com auxílio de anel volumétrico. Uma porção de solo das amostras deformadas referente a cada área de estudo foram acondicionadas em sacos plástico, devidamente identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Análises de Solos do IFMG–SJE. No laboratório as amostras foram destorroadas, peneiradas em peneira de malha de 2 mm e secas ao ar, desse modo, obtendo-se a porção de terra fina seca ao ar (TFSA) para a análise química conforme Teixeira et al. (2017).

Uma outra porção das amostras coletadas foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificadas e levadas ao Laboratório de Microbiologia do IFMG-SJE, onde foram passadas por peneira de 2 mm para separação de raízes e acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob refrigeração a ± 4 °C até o momento de ser analisada com relação ao conteúdo de carbono orgânico total (COT), carbono da biomassa microbiana (CBM) e respiração basal (RBS).

3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS DO SOLO

3.3.1 Análises físicas e químicas

As análises de granulometria, densidade de partículas e densidade do solo foram realizadas de acordo com a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

Quanto a textura dos solos das áreas em estudo, os mesmos foram classificados em suas respectivas classes por meio do triângulo de classificação textural elaborado por Lemos e Santos (1984).

3.3.2 Carbono orgânico total e estoque de C

O carbono orgânico total (COT) foi quantificado por oxidação da matéria orgânica por via úmida com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ 0,167 mol L⁻¹) em meio sulfúrico, com aquecimento externo (170 °C durante 30 minutos) e determinado por titulometria com sulfato ferroso amoniacal (0,1 mol L⁻¹), conforme descrito por Matos et al. (2005) adaptado de Yeomans e Bremner (1988).

Para execução da marcha analítica foram realizadas algumas análises prévias para determinar a quantidade de solo utilizada, conforme sugerido por Matos et al.

(2005). Aproximadamente 2 g de TFSA foram moídas em almofariz e passada por peneira de 0,250 mm (60 mesh), posteriormente 0,2 g de solo peneirado foi transferida para tubo de digestão e adicionou-se o dicromato e em seguida o ácido sulfúrico, observou-se a formação de coloração verde intensa, indicando quantidade de dicromato adicionada não foi suficiente para oxidar todo o C. Repetiu-se o procedimento adicionando-se 0,1 g de solo (recomendado para solos de mata), observou-se a formação da coloração castanho para todas as amostras, dessa maneira, foram utilizadas nas análises 0,1 g para todas as amostras.

A partir dos resultados de COT obtidos nas análises e dos valores de densidade do solo foram estimados os estoques de carbono no solo (ECS) das áreas em estudo conforme equação proposta por Veldkamp (1994):

$$ECS = T * Ds * E * 10 \quad (1)$$

Em que:

ECS = Estoque de C orgânico total ($Mg\ ha^{-1}$);

T = Teor de COT no solo ($g\ kg^{-1}$);

Ds = Densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); e

E = Espessura da camada (m).

3.3.3 Respiração basal de CO₂ (Emissão de CO₂)

A atividade microbiana foi avaliada pela determinação da respiração basal (RBS) (C-CO₂) pelo método descrito por Alef e Nannipieri (1995), cujo princípio consiste na captura de CO₂ liberado da respiração microbiana pela solução de NaOH e formação de Na₂CO₃. Inicialmente pesou-se 20 g de cada amostra de solo em recipientes plásticos identificados. As amostras foram umedecidas até atingirem 60 % da capacidade máxima de retenção de água e colocadas dentro de um pote de 0,5 L juntamente com um béquer de 50 ml contendo 10 ml de NaOH ($0,3\ mol\ L^{-1}$), e foram imediatamente fechados hermeticamente. Após 72 h de incubação, com temperatura controlada de $25 \pm 1\ ^\circ C$, os béqueres foram retirados do pote, sendo adicionado 5 ml de BaCl₂ (20%). Posteriormente adicionou-se três gotas do indicador fenolftaleína e procedeu-se a titulação com HCl (0,1 M) até o ponto de viragem (mudança da cor

branca para cor rósea), anotando-se o volume gasto. O mesmo procedimento foi realizado para prova em branco. Calculou-se a RBS pela seguinte equação:

$$RBS = ((Vb - Va) * M * 6 * 1000) / (Ps * T) \quad (2)$$

Em que:

RBS = carbono oriundo da respiração basal do solo (mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹);

Vb = volume de HCl gasto na titulação da solução controle (branco) (ml);

Va = volume gasto na titulação da amostra (ml);

M = molaridade exata do HCl;

Ps (g) – massa de solo seco; e

T = tempo de incubação da amostra (horas).

3.3.4 Carbono da Biomassa Microbiana

O teor de C da biomassa microbiana (CBM) foi determinado empregando-se o método da fumigação-extração conforme descrito por Vance et al. (1987). O método baseia-se na extração do C microbiano após a morte dos microrganismos e lise celular pelo uso de clorofórmio, com a liberação dos constituintes celulares e posterior quantificação.

A determinação do carbono foi realizada com quatro repetições para cada amostra e quatro brancos (todos reagentes menos o extrato com solo) pipetando-se 8,0 mL do extrato das amostras fumigadas e não-fumigadas em tubos de ensaio, adicionando-se 2 mL da solução 0,066 mol L⁻¹ K₂Cr₂O₇ e 15 mL da mistura H₂SO₄ e H₃PO₄ (2:1). Posteriormente efetuou-se a digestão colocando os tubos em bloco digestor previamente aquecido a 120 °C, mantendo os tubos no bloco durante 30 minutos. Aguardou-se o resfriamento dos tubos em temperatura ambiente e transferiu-se a solução para Erlenmeyer de 125 mL lavando-se os tubos com 25 mL de água destilada. O excesso do dicromato foi titulado com sulfato ferroso amoniacal utilizando-se 4 gotas de difenilamina como indicador.

Para o cálculo do CBM primeiramente calculou-se os teores de C das amostras fumigadas e não fumigadas pela seguinte expressão:

$$C(mg\ C\ kg^{-1}\ solo) = \frac{(Vb - Va) * M * R * 1000 * Vextrator}{(Valiquota) * (Msolo)} \quad (3)$$

Em que:

Vb = volume do branco (mL);

Va = volume da amostra (mL);

Vextrator = volume de extrator utilizado na extração do C da biomassa (mL);

Valiquota = volume de extrato utilizado para a determinação do C (mL);

M = molaridade do sulfato ferroso ($mol\ L^{-1}$);

R = 3, constante referente ao número de mols de $Cr_2O_7^-$ que reagem com Fe^{2+} (1/6), multiplicado pelo número de mols de $Cr_2O_7^-$ que reagem com o C (3/2), multiplicado pelo peso equivalente do C (12);

1000 = fator de conversão de unidade ($mg\ mg^{-1}$ para $g\ kg^{-1}$)

Msolo = quantidade de solo utilizada na extração da biomassa microbiana (g).

O CBM é então calculado a partir da diferença entre os teores de C das amostras fumigadas e não fumigadas:

$$CBM = \frac{C_F - C_{NF}}{K_C} = mgkg^{-1}\ de\ C\ no\ solo \quad (4)$$

Em que:

CBM = carbono da biomassa microbiana;

C_F = amostra fumigada;

C_{NF} = amostra não irradiada;

K_C = 0,33 – fator de correção referente a fração de C extraído pelo K_2SO_4

3.4 ÍNDICES

Após a obtenção dos dados pelas análises, calculou-se as relações entre o teor de CBM e COT, conhecida como quociente microbiano ($qMic$), que indica a qualidade da matéria orgânica e o quociente metabólico (qCO_2) que expressa a taxa de respiração por unidade de biomassa microbiana.

3.4.1 Quociente Metabólico (qCO_2)

Foi determinado segundo Anderson e Domsch (1993) pela equação.

$$qCO_2 = \frac{RBS}{CBM} \quad (5)$$

Em que,

qCO_2 = quociente metabólico (mg C-CO₂ mg⁻¹ CO₂ dia⁻¹);

RBS = Taxa de respiração basal do solo (mg de C-CO₂ kg⁻¹ dia⁻¹); e

CBM = Carbono da biomassa microbiana (mg de CO₂ kg⁻¹).

3.4.2 Quociente Microbiano ($qMic$)

Foi determinado pela relação entre o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o carbono orgânico total (COT), conforme Sparling (1992).

$$qMic = \frac{CBM}{COT} * 100 \quad (6)$$

Em que,

qCO_2 = quociente microbiano (%);

CBM = Carbono da biomassa microbiana (mg kg⁻¹); e

COT = Carbono orgânico total (mg kg⁻¹).

3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e quando apresentaram diferenças significativas, compararam-se as médias utilizando-se o Teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização física demonstra que, nas áreas de mata nativa (MN), eucalipto (EC) e regeneração (RN) estudadas, na profundidade de 0,0–0,05 m, houve predomínio da fração argila, em que os teores variaram de 46,8 a 62,1 dag kg⁻¹, com as áreas de EC e RN de textura argilosa e a área de MN de textura muito argilosa (Tabela 1). O menor valor de argila observado na RN, de acordo com Machado et al. (2014) pode ser explicado pela localização na posição meia encosta, o que caracterizaria intenso processo de carreamento de solo e, conseqüentemente, de nutrientes.

A densidade do solo na MN foi ligeiramente inferior às coberturas de EC e RN, possivelmente em razão do maior período sem interferência antrópica. A densidade é bastante sensível ao manejo do solo e pode ser um eficiente indicador de qualidade, está diretamente relacionada à porosidade, à infiltração de água, ao escoamento superficial de água, ao crescimento do sistema radicular das plantas e à absorção de nutrientes (LUCIANO et al., 2012).

Tabela 1 – Granulometria, densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp) e classe textural do solo na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG.

Cobertura	-----Fração granulométrica-----			Dp	Ds	Classe Textural ¹
	Areia	Argila	Silte			
	-----dag kg ⁻¹ -----			----g cm ⁻³ ----		
MN	22,5	62,1	15,4	2,18	0,92	Muito argilosa
EC	25,6	54,0	20,4	2,37	1,04	Argila
RG	33,9	46,8	19,3	2,49	1,04	Argila

¹Triângulo Textural (Lemos e Santos, 1984).

Fonte: O autor.

Em relação à caracterização química, em geral, melhores valores foram observados na área de regeneração (Tabela 2). Considerando que a área de RN era anteriormente ocupada por lavoura de café e recebia tratamentos culturais constantes, como calagem e adubações de cobertura com matéria orgânica, estes fatores podem ter influenciado o pH do solo (Tabela 2). Os melhores níveis de nutrientes observados nesta área também são justificados pelas práticas de manejo e adubação que eram aplicadas na área quando esta foi ocupada por lavoura de café (Tabela 2).

Evidenciou-se que na área de MN (Tabela 2), devido a sua acidez muito elevada e o menor valor de soma de bases, trata-se de uma área com solo pobre considerando sua fertilidade natural, bastante intemperizado, neste caso Machado et al. (2014) ressaltam a importância da matéria orgânica como agente fundamental na manutenção da fertilidade por meio dos mecanismos de ciclagem de nutrientes.

Tabela 2 – Atributos químicos do solo na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG.

Atributos	Teores e Classificação ⁽¹⁾					
	Mata nativa		Eucalipto		Regeneração	
M.O.S (dag kg ⁻¹)	6,59	Bom	4,62	Bom	5,16	Bom
pH em H ₂ O	3,77	Muito baixo	4,43	Muito baixo	5,48	Baixo
P (mg dm ⁻³)	4,67	Baixo	31,66	Muito bom	17,72	Bom
K (mg dm ⁻³)	54,4	Médio	78,7	Bom	252	Muito bom
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,45	Baixo	0,85	Baixo	3,60	Bom
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,30	Baixo	0,60	Médio	1,15	Bom
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	5,45	Muito alta	1,55	Alta	0,10	Muito baixa
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	16,21	Muito alta	10,51	Muito alta	4,57	Média
SB (cmol _c dm ⁻³)	0,89	Baixo	1,75	Baixo	4,81	Bom
t (cmol _c dm ⁻³)	3,34	Médio	3,30	Médio	4,91	Bom
T (cmol _c dm ⁻³)	17,10	Muito Bom	12,26	Bom	9,38	Bom
V (%)	5,20	Muito baixo	14,20	Muito baixo	51,31	Médio
m (%)	73,37	Alta	46,95	Média	2,03	Muito baixa
Prem (mg L ⁻¹)	8,43		12,01		18,41	

pH em água – Relação 1:2,5; Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ – Extrator KCl 1 mol L⁻¹; H+Al – Extrator SMP; P, K – Extrator Mehlich-1; SB – Soma de bases trocáveis; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; T – Capacidade de troca catiônica a pH 7; V – Saturação por bases; m – Saturação por alumínio; M.O.S – Matéria orgânica (método colorimétrico); Prem – Fósforo remanescente.

¹ Classe de interpretação conforme ALVAREZ V. et al. (1999).

Fonte: O autor.

Os teores de carbono orgânico total (COT) diferiram estatisticamente entre as áreas em estudo, entretanto, em todas as áreas os teores de CO observados estão na classe muito bom, classificação atribuída por Alvarez V. et al. (1999) para teores de acima de 40,6 g kg⁻¹ (Figura 5). Os teores de COT variaram de 45,24 (EC), 46,95 (RN) e 53,05 (MN). Resultados muito inferiores aos obtidos no presente estudo, foram observados por Cunha Neto et al., (2018), que encontraram na profundidade de 0-0,05 m teores de COT na ordem de 32,00; 21,40; e 19,43 g kg⁻¹ em solos sob pastagem,

eucalipto e fragmento de Floresta Secundária Estacional Semidecidual com aproximadamente 40 anos de regeneração, respectivamente.

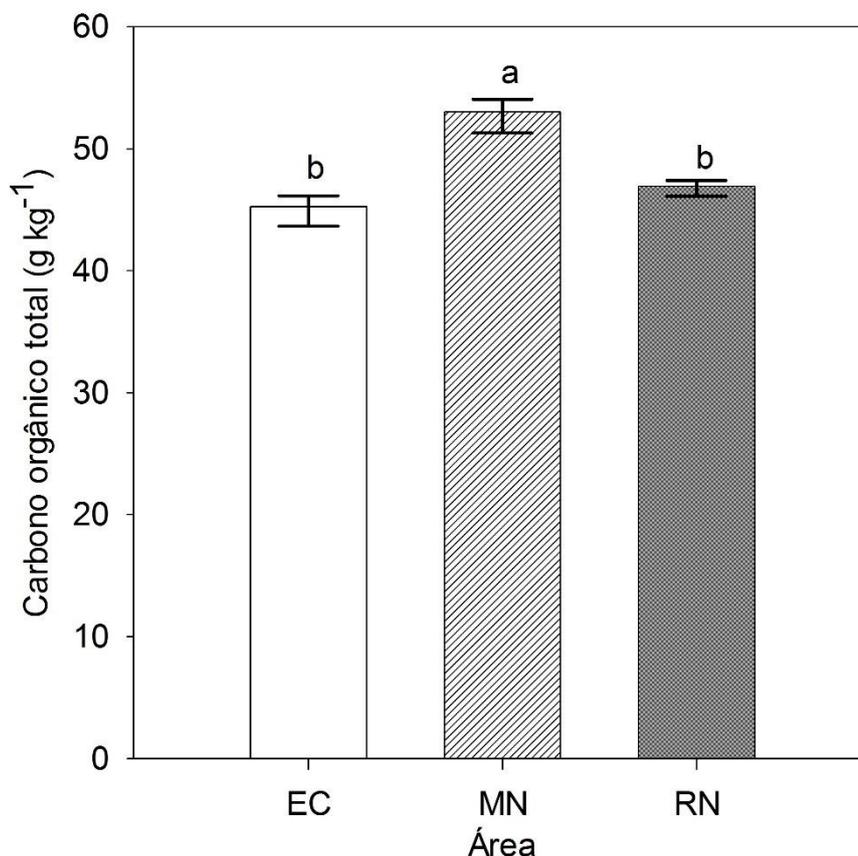


Figura 5 – Teores de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG. As barras verticais representam o erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: O autor.

Santos et al. (2019), avaliando COT na profundidade de 0-0,05 m em Floresta Ombrófila Mista obtiveram 65,3 g kg⁻¹, valores superiores aos que foram obtidos para a área de floresta no presente estudo, entretanto em área de sucessão lavoura-pastagem, os resultados obtidos por estes autores são inferiores (38,2 g kg⁻¹) quando comparados ao observado em área de regeneração neste experimento (46,95 g kg⁻¹). Resultados superiores também foram observados por MACHADO et al. (2014) em Latossolo Vermelho-Amarelo sob floresta nativa (61,09 g kg⁻¹) comparados com sistemas de café consorciado com frutíferas e café a pleno sol, estes sistemas apresentaram resultados inferiores, 32,87 e 37,01 g kg⁻¹, respectivamente.

Os maiores teores de COT observados neste estudo na área de mata nativa diferiam das demais áreas estudadas possivelmente devido a alguns atributos do solo, entre eles o elevado teor de argila. O teor de COT no solo é influenciado pela textura,

sendo frequentemente relacionado aos teores de argila, bem como partículas finas (argila + silte) do solo no Brasil ou em diversas partes do mundo (BARRETO et al., 2006; CUNHA NETO et al., 2018; GATTO et al., 2010; JOBBÁGY, JACKSON, 2000; TSOZUÉ et al., 2019; ZINN et al., 2012; WIESMEIER et al., 2013). A textura é capaz de influenciar os teores de C orgânico, visto que, solos com maiores teores da fração argila favorecem a interação entre a matéria orgânica e os minerais da fração argila, favorecendo a formação de agregados estáveis, promovendo maior estabilidade do carbono orgânico no solo (FONTANA et al., 2010).

A influência da fração argila se deve à grande superfície específica e alta densidade de carga que lhe conferem alta reatividade química com as propriedades do solo (JURY e HORTON, 2004). Rosendo e Rosa (2012) avaliando vegetação nativa de cerrado e pastagem em Minas Gerais consideraram a textura argilosa como determinante para impedir perdas de C orgânico do solo.

Outro atributo do solo que exerce influência no teor de C orgânico é a densidade do solo (Ds) (VELDKAMP, 1994). Como pode ser observado na Tabela 1, a área de MN apresentou menor densidade comparada às áreas de EC e MN. De acordo com Calonego et al. (2012) o baixo valor de Ds em solos de mata nativa é justificado devido a manutenção de sua estrutura preservada sem interferência por meio de práticas agressivas, evitando-se por sua vez a compactação, bem como o elevado teor de matéria orgânica do solo (MOS) (Tabela 2) concorre diretamente para a redução da Ds devido ao baixo peso específico da MOS e à elevada porosidade total, natural da MO humificada.

Segundo Pádua, Guerra, Zinn (2015) o teor de COS apresenta correlação negativa com a Ds, que pode ser explicada devido à baixa densidade de partículas e ação cimentante do COS em macroagregados, aumentando a macroporosidade do solo.

Além dos atributos físicos mencionados, o menor valor de pH (acidez muito elevada) (Tabela 2) observado no solo sob floresta nativa, pode ser explicado pelo maior incremento no aporte de resíduos orgânicos, conseqüentemente favoreceu maior adição de C ao solo na forma de raízes, folhas e ácidos orgânicos (MACHADO et al., 2014). Quanto maior o conteúdo de carbono, maior tenderá ser a acidez do solo (EBELING et al., 2008).

Segundo Mendonça et al. (2006) em qualquer tipo de solo o COS apresenta correlação com a acidez do solo, esta afirmação é corroborada por estudos de diversos autores (BARRETO et al., 2006); VOS et al., 2018; YU et al., 2014). Segundo Silva e Mendonça (2007) o aumento da concentração de carbono influenciado pela adição de

matéria orgânica resultará em aumento ou redução do pH do solo dependendo da predominância dos processos que consomem ou liberam H^+ .

O acúmulo de C na camada superficial do solo é oriundo da adição de material orgânico, principalmente, da serapilheira depositada à medida que a mesma vai sendo humificada (MAFRA et al., 2008). Os menores teores de COT nas áreas de EC e RN (Figura 5) demonstra o impacto negativo ocorrido no solo após a conversão da floresta nativa em áreas de exploração agrícola ou silvicultural, o que pode favorecer decréscimo nas taxas de ciclagem de nutrientes nessas áreas em comparação com as áreas florestais (SILVA et al., 2012).

Em florestas plantadas de eucalipto a tendência é que haja uma equivalência entre as funções principais do solo com ecossistemas naturais, indicando que o cultivo de eucalipto em escala comercial, manejado corretamente, pode proporcionar altos índices de qualidade do solo (FREITAS et al., 2012).

É importante ressaltar que, apesar da grande quantidade de material orgânico aportado no solo sob eucalipto, o teor de COT observado no presente estudo, não atingiu o nível encontrado na MN e também, não apresentou diferença significativa comparado à área de RN, indicando uma possível perda de C via remoção devido ao carreamento da matéria orgânica por arraste superficial favorecido pela localização do plantio em área de encosta. A deposição média de serapilheira em um plantio de eucalipto é de $10,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ao final de uma rotação de 5,5 anos em São João Evangelista-MG (JESUS et al., 2015). Comparando as áreas de EC e RN, não houve diferenças estatísticas significativas para os teores de COT, provavelmente, as gramíneas, por serem plantas C4, contribuem para elevar e manter os aportes de C no solo e seu sistema radicular fasciculado também aporte grande quantidade de C, indicando maior estabilização do C pelo aumento na fração húmica (BARRETO et al., 2006; BARRETO et al., 2008).

Os estoques de carbono orgânico no solo (ECS) (Figura 6), 23,4; 24,3 e 24,5 Mg ha^{-1} observados neste trabalho em EC, MN e RN respectivamente, são semelhantes aos obtidos por Klug (2014), que encontrou 23,4; 26,1 e 24,7 em estudo conduzido em Cambissolo Húmico sob eucalipto, mata nativa e regeneração respectivamente. Santos et al. (2019) encontraram 21,6; 16,1 e 21,4 Mg ha^{-1} , respectivamente, avaliando floresta natural, plantio de *Pinus* sp. e área de sucessão lavoura/pastagem em um Nitossolo de 0-0,05 m.

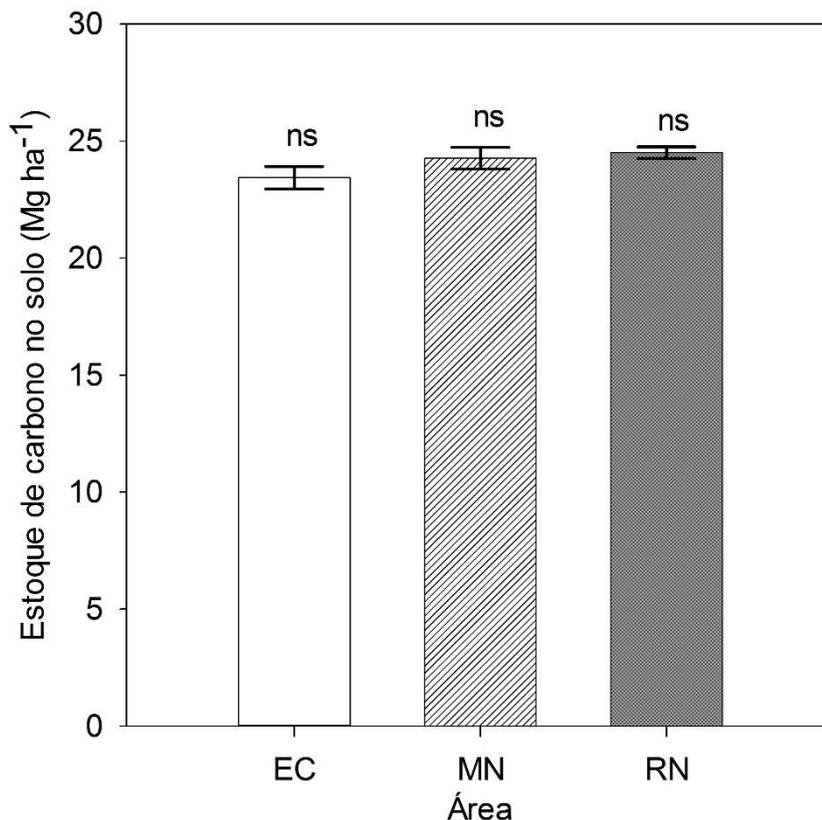


Figura 6 – Estoques de carbono do solo (ECS) na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG. As barras verticais representam o erro padrão. ns: não significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Fonte: O autor.

Em estudo conduzido em regiões próximas ao município de São João Evangelista, Gatto et al. (2010) encontraram resultados de ECS que variaram entre 32,7 e 64,78 Mg ha⁻¹ nos municípios de Sabinópolis e Virginópolis em Minas Gerais, corroborando com o potencial de estoque de carbono observado no presente estudo para a região. Estes valores foram observados em Latossolo Amarelo na camada de 0-0,2 m, por sua vez, os mesmos autores observaram 55,79 e 50,41 Mg ha⁻¹ em Latossolo Vermelho nos mesmos municípios.

No Vale do Jequitinhonha, Pulrolnik et al. (2009) concluíram que os cultivos de eucalipto (23,57 t ha⁻¹) e de pastagem (23,88 t ha⁻¹) aumentaram os estoques de COT no solo na camada de 0–0,1 m de profundidade em relação a vegetação natural de cerrado (22,39 t ha⁻¹). Isso se deve provavelmente à maior produção de serapilheira no eucalipto e ao sistema radicular de ciclagem rápida da pastagem e (PULROLNIK et al., 2009). Isto pode explicar o valor do ECS obtido neste estudo, uma vez que a área de regeneração inicialmente foi ocupada por gramíneas antes do estabelecimento das

árvores pioneiras devido as práticas de controle de plantas infestantes terem sido encerradas após a remoção da lavoura de café.

Lima et al. (2006) estudando a dinâmica do carbono em cronosequência na região do Vale do Rio Doce, ao final de 30 anos de avaliações, afirmam que a substituição de pastagens degradadas por plantios de eucalipto acarretam em um maior estoque de carbono principalmente nas camadas mais superficiais 0-0,05 e 0,05-0,1 m, com uma média de acumulação anual de $0,23 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com pico no final da terceira rotação (aproximadamente 18 anos) acumulando $0,57 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Embora não tenha sido observada diferença estatística, os menores estoques de carbono (Figura 6) na área cultivada com EC em comparação com as áreas de MN e RN, pode ser devido à absorção da cultura do eucalipto, perdas de lixiviação e erosão da superfície, o manejo inadequado da terra pode ter contribuído para o baixo armazenamento de carbono no solo. De acordo com Gatto et al. (2010) em condições de temperatura média anual de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e déficit hídrico acentuado ($< 300 \text{ mm}$) durante o inverno a produtividade do eucalipto é menor, resultando em menores taxas de mineralização e decomposição da MOS, consequentemente refletindo em menores teores de C incorporado e estocado no solo, corroborando com os resultados observados no presente estudo. Os autores afirmam que 50 % das variações do ECS foram explicadas de modo significativo pela altitude e pelos teores de argila e Al do solo nas camadas superficiais.

A densidade do solo sob plantio de eucalipto também pode ter causado o aumento nos estoques de C, segundo Jesus et al. (2015) em estudo realizado em plantações de eucalipto em São João Evangelista, observaram que a compactação do solo com o tráfego de máquinas de colheita (forwarder) provocou aumento de 12,5% no teor de COT do solo.

Maia et al. (2019) afirma que a baixa perturbação do solo, a fertilização orgânica anual (esterco bovino) e o aporte de resíduos em áreas cultivadas, concorre diretamente para a manutenção ou até mesmo o aumento do ECS no solo comparado com vegetação nativa, mesmo em áreas com menores teores de argila que as áreas de vegetação nativa.

Valores mais elevados do carbono da biomassa (CBM) foram observados em amostra de solo de eucalipto, em média, o valor de CBM sob eucalipto foi cerca de 1,5 e 1,8 vezes, respectivamente, superior aos valores encontrados nos solos sob a MN e RN. Maiores valores de quociente microbiano ($q\text{Mic}$) foram obtidos para o solo cultivado com floresta de eucalipto, diferindo estatisticamente das áreas de mata nativa e

regeneração, que por sua vez, não diferiram entre si. Os valores de respiração basal (RBS) e quociente metabólico (qCO_2) não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as três coberturas vegetais avaliadas (Tabela 3).

Tabela 3 – Atributos microbiológicos do solo na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG.

Cobertura	CBM	RBS	qCO_2	$qMic$
	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹ solo hora ⁻¹	mg C-CO ₂ kg ⁻¹ CBM dia ⁻¹	%
EC	936,93 a	1,25 ns	0,03 ns	2,07 a
MN	646,14 b	1,43 ns	0,06 ns	1,22 b
RN	511,14 b	2,57 ns	0,10 ns	1,09 b

CBM: carbono da biomassa microbiana, RBS: Respiração basal, qCO_2 , quociente metabólico, $qMIC$: quociente microbiano. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo.

Fonte: O autor.

O Carbono da biomassa microbiana (CBM) representa um dos compartimentos da MOS com menor tempo de ciclagem, a biomassa microbiana responde rapidamente às práticas que levam ao decréscimo ou acréscimo da matéria orgânica do solo (SILVA, MENDONÇA, 2007). Os maiores valores de CBM foram observados na área de eucalipto. A mata nativa e a regeneração não apresentaram diferenças significativas para este atributo. O plantio de eucalipto apresentou teores de 936,93 mg kg⁻¹, valores muito superiores aos observados por Gama-Rodrigues et al. (2005), que encontraram 401,06 mg kg⁻¹ em amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo coletadas de 0-0,1 m de profundidade no município de Guanhães-MG. No Vale do Jequitinhonha Pulrolnik et al. (2009) encontraram 188,3 mg kg⁻¹ para solos sob plantio de eucalipto.

Valores superiores aos obtidos no presente estudo foram obtidos por Silva et al. (2010), que obtiveram 966,5 mg kg⁻¹ em amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo coletadas de 0-0,1 m de profundidade, na região de Campo das Vertentes, Minas Gerais, em vegetação de cerrado nativo.

Guimarães et al. (2017) estudando diferentes sistemas de cultivo de café, observaram valores semelhantes ao presente estudo, com maior valor na ordem de 796,83 mg kg⁻¹ e menor 359,60 mg kg⁻¹ para fragmento de floresta nativa e cafeeiro em monocultivo respectivamente, resultados obtidos avaliando a camada de 0-0,1 m de profundidade.

Embora não tenham ocorrido diferenças significativas, o maior valor de RBS observado na área de RN pode ter ocorrido devido ao maior valor de pH que pode ter

estimulado a respiração microbiana (mediada por plantas) pelos mecanismos de exsudação radicular, alocação micorrízica e rizodeposição estimulando a decomposição dos reservatórios de COS existentes (MARINOS e BERNHARDT, 2018).

Uma taxa de respiração elevada pode ser desejável quando se considera que a decomposição dos resíduos orgânicos irá disponibilizar nutrientes para as plantas, porém, uma alta atividade respiratória também pode acarretar na decomposição da matéria orgânica mais estável, podendo levar ao comprometimento de processos químicos e físicos, como a agregação, a capacidade de troca catiônica e capacidade de retenção de água, podendo ocorrer, também, a perda de nutrientes (REIS JUNIOR e MENDES, 2007).

Thomazini et al. (2015) ressaltam a importância da manutenção da biomassa arbórea e a utilização de sistemas consorciados com florestas visando reduzir os impactos sobre os estoques de MOS, principalmente prevenir os efeitos do aquecimento global na temperatura do solo e na taxa de respiração basal do solo.

A respiração basal observada no presente estudo encontra-se próxima aos valores obtidos por Moreira e Costa (2004), que avaliaram a dinâmica da recuperação de clareiras na floresta amazônica. Os autores encontraram taxa de $1,65 \text{ mg kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}$ na floresta nativa, semelhante ao fragmento de mata (Tabela 3), observando decréscimo para $0,86 \text{ mg kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}$ quando a clareira foi aberta, posteriormente os valores de RBS foram aumentados gradativamente no período de 0, 1, 2, 4 e 10 anos, quando atingiu valores próximos à mata nativa, indicando que o efeito do impacto na RBS é imediato e o reestabelecimento é gradual em relativo curto período de tempo.

Guimarães et al. (2017) obtiveram valor de RBS superior para fragmento de floresta nativa ($2,04 \text{ mg kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}$) quando comparado à área de mata, porém inferior ao maior valor obtido neste estudo, que foi de $2,57 \text{ mg kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}$ em área de regeneração.

Os valores de $q\text{CO}_2$ não apresentaram diferença estatística entre as áreas. Esse quociente representa a evolução de C- CO_2 do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana em determinado intervalo de tempo, de maneira que, à medida que a biomassa microbiana se torna mais eficiente na utilização dos recursos do ecossistema, menos CO_2 é perdido pela respiração e maior proporção de C é incorporada aos tecidos microbianos, resultando em menor valor de $q\text{CO}_2$ (GONÇALVES et al., 2019).

Uma biomassa mais eficiente seria aquela que perderia menos C na forma de CO_2 com a respiração e incorporasse mais C aos tecidos microbianos. Em amostras que

apresentam os mesmos valores de CBM, aquela que mostra uma menor taxa de respiração ($< qCO_2$) é considerada a mais eficiente (REIS JUNIOR e MENDES, 2007).

O maior valor de quociente metabólico observado para RN encontra-se dentro do esperado, conforme destacam Anderson e Domsch (1993), normalmente, valores mais elevados de qCO_2 , são associados com ecossistemas jovens, submetidos a alguma condição de estresse, por sua vez, menores valores, geralmente são associados com ecossistemas em estágio de maturidade avançados tendo atingido a estabilidade. Lu et al. (2014) avaliando diferentes coberturas vegetais observaram decréscimo dos valores de qCO_2 na camada de 0-0,05 m na ordem de pastagem > plantação de bambu > plantio de *Pinus* sp. > floresta em regeneração > floresta natural, evidenciando o pressuposto de que ecossistemas mais estáveis apresentam quociente metabólico mais baixos. Silva et al. (2010) encontraram valores de qCO_2 superiores para plantio de eucalipto (0,31 mg C-CO₂ mg⁻¹ CBM dia⁻¹) quando comparados ao presente trabalho.

O quociente microbiano ($qMic$), que expressa a proporção CBM/COT, de maneira geral, indicam que maiores valores representam maior ciclagem de nutrientes e, conseqüentemente, menor acúmulo de C (ANDERSON e DOMSCH, 1989), e em condições limitantes aos microrganismos, a capacidade de utilização do C é menor, reduzindo os valores do $qMIC$ (REIS et al., 2019). Altos índices de $qMic$ indicam que a matéria orgânica do solo é ativa e está sujeita a ser decomposta pela microbiota (DADALTO et al., 2015).

Os elevados valores de $qMic$ (2,07 %) do eucalipto em comparação com as áreas de RN e MN, indicam elevada taxa de ciclagem, 1,7 vezes superior ao solo de mata (1,22 %), sugerindo que possivelmente existem grupos de microrganismos adaptados àquelas condições. Em determinadas condições, os atributos biológicos mostram o desenvolvimento de maturidade de ecossistemas influenciados pelo pH, sugerindo especificidade nas atividades microbiológicas (PEREZ; RAMOS; MCMANUS, 2004).

O baixo valor de pH na área de MN pode ser um indicador de estresse ambiental refletindo no $qMic$ (ANDERSON e DOMSCH, 1993), em solos com pH mais baixos, compostos tóxicos são produzidos, ao contrário dos solos com pH mais alto (VANCE et al., 1987).

Opostamente ao que foi observado neste estudo, geralmente ocorre maior relação de CBM / COT em florestas naturais ou regeneradas, sendo justificada com base na maior diversidade do substrato orgânico produzido e aportes destes no local (ANDERSON e DOMSCH, 1978). À medida que a qualidade da matéria orgânica é

promovida, em termos de diversidade e quantidade de material orgânico adicionado ao solo, incrementos na BMS e no q_{Mic} são verificados, mesmo que os teores de COT sejam mantidos (INSAM e DOMSCH, 1988).

Pulrolnik et al. (2009) obtiveram resultados contrários, em que observaram menores valores da proporção C-BM / COT em solos de pastagem e eucalipto, o que poderia indicar que a disponibilidade de substrato para os microrganismos do solo foi relativamente baixa, e, ou, que as condições foram mais desfavoráveis para o crescimento microbiano.

Gama-Rodrigues et al. (2008) obtiveram 1,95 % para o q_{Mic} em plantio de eucalipto, valores próximos aos demonstrados no presente experimento, porém, estes valores foram inferiores às demais áreas avaliadas, tendo sido observado 3 % para área de pastagem.

Moreira e Costa (2004) concluíram que em áreas reflorestadas, a recuperação do COT é lenta e progressiva, entretanto, RBS e q_{CO_2} , responderam a curto prazo às alterações da cobertura vegetal do solo.

5 CONCLUSÃO

O reflorestamento com eucalipto e a regeneração natural antecedida por cultivo de café mantiveram os estoques de C orgânico na camada do solo de 0,0-0,05 m em níveis equivalentes aos de mata nativa.

O plantio de eucalipto proporcionou os maiores teores de carbono da biomassa microbiana, indicando maior estabilidade do sistema.

Os valores de qCO_2 observados indicaram que a serapilheira do EC constitui fonte abundante de C orgânico e energia para os microrganismos.

O quociente microbiano (relação CBM / COT) indicou que no plantio de eucalipto a microbiota está com menor índice de estresse.

REFERÊNCIAS

- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic, 1995. 576 p.
- ALMEIDA, L. S. de; FERREIRA, V. A. S.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A.; OLIVEIRA, A. L. G.; SAMPAIO, R. A. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p. 1539-1547, 2016.
- ALVAREZ V, V. H.; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. 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**. 5 ed. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 25-32.
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 10, p. 215-221, 1978.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.
- ANDERSON T. H.; DOMSCH, K. H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil biology and biochemistry**, v. 21, n. 4, p. 471-479, 1989.
- AZEVEDO, T. R. de; COSTA JUNIOR, C., BRANDÃO JUNIOR, A.; CREMER, M. dos S.; PIATTO, M.; TSAI, D. S.; BARRETO, P.; MARTINS, H.; SALES, M.; GALUCHI, T.; RODRIGUES, A.; MORGADO, R.; FERREIRA, A. L.; SILVA, F. B. e; VISCONDI, G. de F.; SANTOS, K. C. dos; CUNHA, K. B. da; MANETTI, A.; COLUNA, I. M. E.; ALBUQUERQUE, I. R. de; WATANABE JUNIOR, S.; LEITE, S.; KISHINAMI, R. SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, p.1-43, 2018.
- BARRETO, A. C.; FREIRE, M. B. G. dos S.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J.; INÁCIO, E. dos S. B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1471-1478, 2008.
- BARRETO, A. C.; LIMA, F. H. S.; FREIRE, M. G. B. dos S.; ARAÚJO, Q. R. de; FREIRE, F. J. Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. **Caatinga**, v.19, n.4, p. 415-425, 2006.
- BOCUTI, E. D.; AMORIM, R. S. S.; SANTOS, T. G. dos; DI RAIMO, L. A. D. L.; PEREIRA, H. G. Erodibilidade entressulcos e sua relação com atributos de solos do Cerrado. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 71-80, 2019.

BRAGA, F. A., BARROS, N. F., SOUZA, A. L., COSTA, L. M. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 291-298, 1999.

CALONEGO, J. C.; SANTOS, C. H. dos; TIRITAN, C. S.; CUNHA JÚNIOR, J. R. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 2, p. 128-135, 2012.

CAMARGO, O. A. de; MONIZ, A.C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada)

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R. de; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.2, p. 277-289, 2010.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. dos S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do Solo e Acúmulo de Carbono na Integração Lavoura-Pecuária em Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015.

COUTINHO, R. P.; URQUIAGA, S; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; TORRES, A. Q. A.; JANTALIA, C. P. Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 2, p.195-203, 2010.

CUNHA NETO, F. V. da; PEREIRA, M. G.; LELES, P. S. dos S.; ABEL, E. L. da S. Atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagem em Além Paraíba - MG. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 13-24, 2018.

DADALTO, J. P.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; MATOS, A. de T. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v.35, n.3, p. 506-513, 2015.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.2, p.179-186, 2004.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C. dos; PEREZ, D. V.; PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. **Bragantia**, v. 67, n. 2, p. 429-439, 2008.

FONTANA, A.; SILVA, C. F. da; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BRITO, R. J. de; BENITES, V. de M. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 545- 550, 2011.

FREITAS, D. A. F. de; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L. CURI, N. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 417-428, 2012.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. Mapa de Solos do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: 2010. Disponível em: <<http://www.feam.br/banco-de-noticias/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>>. Acesso em: 22 de dez. de 2019.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; MENDONÇA, E. de S. Alterações edáficas sob plantios puros e misto de espécies florestais nativas do Sudeste da Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 581-592, 1999.

GASPAR, R. de O.; CASTRO, R. V. O.; DEL PELOSO, R. V.; SOUZA, F. C. de; MARTINS, S. V. Análise fitossociológica e do estoque de carbono no estrato arbóreo de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 313-324, 2014.

GONÇALVES, A. do N.; SANTOS NETO, J. B. dos; SILVA, J. V. da; MACHADO, H. C. S.; SILVA, A. G. da. Levantamento fitossociológico de um fragmento de floresta estacional semidecidual no município de São João Evangelista. **Revista Agroambiental**, v. 2, n. 3, p. 35-45, 2010.

GONÇALVES, F. G.; CARVALHO, A. G. de; CARDOSO, W. V. M.; RODRIGUES, C. dos S. Coleópteros broqueadores de madeira em ambiente natural de Mata Atlântica e em plantio de eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 245-250, 2014. Embrapa Florestas.

GONÇALVES, I.; FONSECA, F.; FIGUEIREDO, T. de. Evolução Temporal do Carbono Armazenado em Povoamentos Florestais Jovens: Efeito da Intensidade de Preparação do Terreno. **Silva Lusitana**, v. 21, p. 111-125, 2013.

GONÇALVES, V. A.; MELO, C. A. D.; ASSIS, I. R. de; FERREIRA, L. R.; SARAIVA, D. T. Biomassa e atividade microbiana de solo sob diferentes sistemas de plantio e sucessões de culturas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-8, 2019.

GUIMARÃES, N. de F.; GALLO, A. de S.; FONTANETTI, A.; MENEGHIN, S. P.; SOUZA, M. D. B. de; MORINIGO, K. P. G.; SILVA, R. F. da. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, p. 34-44, 2017.

HUGAR, G. M. Effect of Soil Organic Carbon on Perviousness and Conservation Property of Soil. **Indian Geotechnical Journal**, v. 47, p. 559–570, 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em: 31 dezembro 2019.

INSAM, H.; DOMSCH, K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. **Microbial Ecology**, v.15, n.2, p. 177-188, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**: sistema fitogeográfico, inventário das formações

florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. Rio de Janeiro: IBGE- Diretoria de Geociências, 2012. 271 p. (Manuais Técnicos de Geociências, 1).

IPCC – INTERNATIONAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva, 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 05 jan. 2019.

JESUS, G. L. de; SILVA, I. R.; Almeida, L. F. J.; SANTOS, M. A. dos; Leite, F. P. NEVES, J. C. L. Produtividade do Eucalipto, Atributos Físicos do Solo e Frações da Matéria Orgânica Influenciadas pela Intensidade de Tráfego e Resíduos de Colheita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1190-1203, 2015.

JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, v. 10, n. 2, p. 423–436, 2000.

JURY, W. A.; HORTON, R. **Soil Physics**. 6. ed. New Jersey: Hoboken, 2004. 384 p.

KLEIN, V. A.; MADALOSSO, T.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; VEIGA, M.; ALBUQUERQUE, J. A.; PAULETTO, E. A. Metodologias de controle de qualidade de análises granulométricas do solo. **Ciência Rural**, v. 43, n. 5, p. 850-853, 2013.

KLUG, I. **Estoque e frações granulométricas do carbono em solo de altitude do Rio Grande do Sul sob diferentes vegetações**. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. *In*: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Handbuch der Klimatologie. Berlin: **Gerbrüder Bornträger**, 1936. p. 1-44.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, p. 1623-1627, 2004.

LA SCALA JÚNIOR, N., MENDONÇA, E. de S.; Souza, J. V. de; PANOSSO, A. R., SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R. Spatial and temporal variability in soil CO₂-C emissions and relation to soil temperature at King George Island, maritime Antarctica. **Polar Science**, v. 4, n. 3, p. 479–487, 2010.

LEMOES, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 1984. 46p.

LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; MENDONÇA, E. S.; SMYTH, T. J.; MOREIRA, M. S.; LEITE, F. P. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in Southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 235, p. 219-231, 2006.

LUCIANO, R.V.; ALBUQUERQUE, J.A.; COSTA, A. da; BATISTELLA, B.; WARMLING, M.T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob

vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p. 1733-1744, 2012.

MACHADO, L. V.; RANGEL, O. J. P.; MENDONÇA, E. de S.; MACHADO, R. V.; FERRARI, J. L. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 289-299, 2014.

MAFRA, A. L. et al. GUEDES, S. de F. F.; FILHO, O. K.; SANTOS, J. C. P.; ALMEIDA, J. A. de; Rosa, J. D. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, v. 32, n. 2, p. 217-224, 2008.

MAIA, S. M. F.; OTUTUMI, A. T.; MENDONÇA, E. de S.; NEVES, J. C. L.; OLIVEIRA, T. S. de. Combined effect of intercropping and minimum tillage on soil carbon sequestration and organic matter pools in the semiarid region of Brazil. **Soil Research**, v. 57, p. 266–275, 2019.

MALAVOLTA, E. Fertilidade dos solos da Amazônia. In: VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C. (Ed.). **Amazônia: seus solos e outros recursos naturais**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1987. p.3 74-416.

MARINOS, R. E.; BERNHARDT, E. S. Soil carbon losses due to higher pH offset vegetation gains due to calcium enrichment in an acid mitigation experiment. **Ecology**, v. 99, n. 10, p.2363-2373, 2018.

MATOS, E. da S.; MENDONÇA, E. de S.; MORALES, M. M.; SILVA, B. R. da. Carbono total e frações químicas de carbono do solo. In: MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. **Matéria Orgânica do solo: Métodos de Análises**. Viçosa: UFV-Gefert, 2017. p. 9-15.

MELE, P. M.; CARTER, M. R. Effect of climatic factors on the use of microbial biomass as an indicator of changes in soil organic matter. In: MULONGOY, K.; MERCKX, R. **Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture**. New York: John Wiley & Sons, 1993. p.57-64.

MELLONI, R. MELLONI, E. G.P.; ALVARENGA, M. I. N.; VIEIRA, F. B. M. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p.2461-2470, 2008.

MENDONÇA, E. de S.; ROWELL, D. L.; GUARÇONI, A. G.; SILVA, A. P. da. Effect of pH on the development of acidic sites in clayey and sandy loam Oxisol from the Cerrado Region, Brazil. **Geoderma**, v. 132, 131–142, 2006.

MOREIRA, A.; COSTA, D. G. Dinâmica da matéria orgânica na recuperação de clareiras da floresta amazônica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n.10, p.1013-1019, 2004.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.11, p. 1103-1110, 2004.

NASCIMENTO, P. C. do; LANI, J. L.; Mendonça, E. de S.; ZOFFOLI, H. J. de O.; Peixoto, H. T. M. Teores e características da matéria orgânica de solos hidromórficos do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 339-348, 2010.

NAVROSKI, D.; MOREIRA, A.; COLOZZI-FILHO, A.; GRANGE, L. Atributos microbiológicos do solo em diferentes sistemas de manejo no oeste paranaense. **Agrotropica**, v. 29, n. 2, p. 127-134, 2017.

NÓBREGA, G. N.; FERREIRA, T. O.; ARTUR, A. G.; MENDONÇA, E. S. de; LEÃO, R. A. de O.; TEIXEIRA, A. S.; OTERO, X. L. Evaluation of methods for quantifying organic carbon in mangrove soils from semi-arid region. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, p. 282-291, 2015.

PACHECO, M. R. P. dos S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estudos Avançados**, v. 4, n. 9, p. 204-220, 1990.

PÁDUA, E. J. de; GUERRA, A. R.; ZINN, Y. L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 725-736, 2015.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R. da; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de; FONSECA, S.; DAMBROZ, C. S. Estoques de carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica em argissolo sob eucalipto e pastagem. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 261-273, 2011.

PRIMIERY, S.; MUNIZ, A. W.; LISBOA, H. de M. Dinâmica do Carbono no Solo em Ecossistemas Nativos e Plantações Florestais em Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p.1-9, 2017.

PULROLNIK, K.; BARROS, N. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BRANDANI, C.B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1125-1136, 2009.

PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. L. G.; MCMANUS, C. Carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com soja sob diferentes sistemas de manejo nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 567-573, 2004.

REIS, D. A.; PORTELLA, R. B.; FAGUNDES, M. O.; FEITOSA JÚNIOR, F. R.; SANTOS, J. R. S.; BOGIANI, J. C.; PERINA, F. J. Grau de dispersão, biomassa microbiana e carbono orgânico de um latossolo cultivado com soja sob plantio convencional e direto no cerrado (savana) do oeste da Bahia, Brasil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.1, p.363-375, 2019.

REIS JUNIOR, F. B. dos; MENDES, I. de C. **Biomassa Microbiana do Solo**. 1 ed. Planaltina: Embrapa, 2007. 40 p.

ROSENDO, J. dos S.; ROSA, R. Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de cerrado. **Sociedade & Natureza**, v. 24, n. 2, p. 359-376, 2012.

SANTOS, K. F. dos; BARBOSA, F. T.; BERTO, I.; WERNER, R. de S.; WOLSCHICK, N. H.; MOTA, J. M. Teores e estoques de carbono orgânico do solo em diferentes usos da terra no Planalto Sul de Santa Catarina. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 2, p. 222-229, 2019.

SILVA, C. F. da; PEREIRA, M. G.; MIGUEL, D. L.; FEITORA, J. C. F.; LOSS, A.; MENEZES, C. E. G.; SILVA, E. M. R. da. Carbono orgânico total, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo de áreas agrícolas, florestais e pastagem no médio Vale do Paraíba do Sul (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1680-1689, 2012.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO_2). Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. 4 p. (Comunicado técnico, 99).

SILVA, D. M. N. da; VENTURIM, C. H. P.; CAPUCHO, M. E. O. V.; OLIVEIRA, F. L. de; MENDONÇA, E. de S. Impact of soil cover systems on soil quality and organic production of yacon. **Scientia Horticulturae**, v. 235, p. 407–412, 2018.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. de S. Matéria orgânica do solo. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L., eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SILVA, R. R. da; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. de S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1585-1592, 2010.

SOUZA, J. L. de; PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI M., A. Potencial de sequestro de carbono em solos agrícolas sob manejo orgânico para redução da emissão de gases de efeito estufa. **IDESIA**, v. 30, n. 1, p. 7-15, 2012.

SPARLING G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research**. v. 30, p. 195-207, 1992.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017. 574 p.

THOMAZINI, A., MENDONÇA, E. S., CARDOSO, I. M., GARBIN, M. L. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 15–24, 2015.

TSOZUÉ, D.; NGHONDA, J. P.; TEMATIO, P.; BASGAS. D. Changes in soil properties and soil organic carbon stocks along an elevation gradient at Mount Bambouto, Central Africa. *Catena*, v. 175, p. 251-262, 2019.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.175-180, 1994.

VITAL, M. H. S. Aquecimento global: Acordos internacionais, emissões de CO₂ e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. **BNDES**, v. 24, n. 48, p. 167-244, 2018.

VOS, C., JACONI, A., JACOBS, A.; DON, A. Hot regions of labile and stable soil organic carbon in Germany – Spatial variability and driving factors. **Soil**, v. 4, p. 153–167, 2018.

YU, P.; LI, Q.; JIA, H.; LI, G.; ZHENG, W.; SHEN, X.; DIABATE, B.; ZHOU, B. Effect of Cultivation on Dynamics of Organic and Inorganic Carbon Stocks in Songnen Plain. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 5, p. 1574-1582, 2014.

ZINN, Y. L.; GUERRA, A. R.; SILVA, A. C.; MARQUES, J. J.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N. Perfis de carbono orgânico do solo nas regiões Sul e Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais: modelagem em profundidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1395-1406, 2012.

APÊNDICE

Tabela 1 – Resumo das análises de variância para valores médios de carbono orgânico total, estoque de carbono no solo, carbono da biomassa microbiana, respiração basal, quociente metabólico e quociente microbiano do solo na camada de 0-0,05 m, na mata nativa (MN), plantio de eucalipto (EC) e regeneração (RN), em São João Evangelista, MG.

Carbono orgânico total				
Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Grupo	2	101,11	50,56	24,09*
Resíduo	6	12,59	2,10	
Total	8	113,70		
Estoque de carbono no solo				
Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Grupo	2	1,91	0,95	1,90 ^{ns}
Resíduo	6	3,02	0,50	
Total	8	4,93		
Carbono da biomassa microbiana				
Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Grupo	2	284085,46	142042,73	34,76*
Resíduo	6	24520,14	4086,69	
Total	8	308605,61		
Respiração basal				
Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Grupo	2	4,12	2,06	1,58 ^{ns}
Resíduo	9	11,71	1,30	
Total	11	15,83		
Quociente metabólico				
Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Grupo	2	0,01	0,004	1,21 ^{ns}
Resíduo	6	0,02	0,003	
Total	8	0,03		
Quociente microbiano				
Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Grupo	2	1,70	0,85	43,04*
Resíduo	6	0,12	0,02	
Total	8	1,82		

* Significativo em 1% de probabilidade e ns não significativo em 1% e em 5 % pelo Teste.

Fonte: O autor.