



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DE
QUALIDADE DO SOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS
NO CERRADO**

LÍDIA TARCHETTI DINIZ

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

Brasília-DF

2012



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DE
QUALIDADE DO SOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS
NO CERRADO**

LÍDIA TARCHETTI DINIZ
ORIENTADORA: Ph.D. MARIA LUCRÉCIA GEROSA RAMOS

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: 008D/2012

Brasília-DF

2012



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DE QUALIDADE DO
SOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS NO CERRADO**

LÍDIA TARCHETTI DINIZ

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM AGRONOMIA.

APROVADA POR:

Maria Lucrecia Gerosa Ramos, Ph.D., (UnB – FAV), CPF: 002.094.4438-12, e-mail: lucrecia@unb.br (Orientadora)

Jean Kleber de Abreu Mattos, Dr, (UnB – FAV), CPF: 002.288.1816-8, e-mail: kleber@unb.br (Examinador interno)

Cícero Célio de Figueiredo, Dr, (UnB – FAV), CPF: 029.754.447-02, e-mail: cicerocef@unb.br (Examinador interno)

Eiyti Kato, Dr, (UnB – FAV), CPF: 143.483.571-53. E-mail: Kato@unb.br (Examinador interno)

Arminda Moreira de Carvalho, Dra, (EMBRAPA CERRADOS), CPF: 409.440.034-11, e-mail: arminda.carvalho@embrapa.br. (Examinadora externa)

BRASÍLIA-DF, 21 de Dezembro de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

Diniz, Lídia Tarchetti

Variação espaço-temporal de atributos de qualidade do solo sob macaubeiras nativas no Cerrado/Lídia Tarchetti Diniz; orientação de Maria Lucrecia Gerosa Ramos – Brasília, 2012.

Numero 112p.: Il.

Tese de doutorado (D) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2012.

1. Qualidade ambiental.
2. Indicadores biológicos e físico-químicos.
3. Estoques de carbono e nitrogênio.
4. *Acrocomia aculeata*.
4. Matéria orgânica. I. Ramos, M. L. G. II. Título, Ph.D.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DINIZ, L. T. **Variação espaço-temporal de atributos de qualidade do solo sob macaubeiras nativas no Cerrado**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2012, 112pp. Tese de Doutorado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Lídia Tarchetti Diniz

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Variação espaço-temporal de atributos de qualidade do solo sob macaubeiras nativas no Cerrado.

GRAU: Doutora

ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.

Nome: Lídia Tarchetti Diniz
E-mail: ltarchetti@gmail.com

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida!!!

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

Em especial à professora Lucrécia, pela compreensão, paciência, persistência e orientação, que proporcionaram o aprofundamento e a melhoria deste trabalho e o exemplo profissional de comprometimento e ética.

A todos os profissionais e estagiários que passaram pelo laboratório de microbiologia e bioquímica do solo da FAV/UnB e que colaboraram na execução e melhoria desse trabalho: Douglas, Ana Paula Reis, Leandro e Adriene obrigada por tudo.

Às amigas de doutorado Thaís, Julcéia, Karol, Luciana, Juliana, Marília, pelos momentos de descontração e tensão, mas sempre regados com bom humor.

À amiga Helena por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis desse trabalho.

Ao professor Vivaldi pela paciência, profissionalismo e ensinamentos estatísticos.

A todos servidores e professores da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UnB, pela oportunidade da realização deste curso de doutorado.

A CAPES pelo auxílio financeiro.

Aos meus irmãos e pais queridos.

Agradecimento especial, com amor e carinho, ao meu companheiro Raimundo Elder, que me aturou nos momentos difíceis da realização deste trabalho.

À pequena Lara Lis, amor da minha vida, que suportou bravamente todas as etapas: coletas em campo, análises laboratoriais e qualificação, ainda na barriga. E que aos quatro meses me acompanhou em coletas a campo, análises laboratoriais e este ano me ajudou a escrever.

Aos amigos especiais da FAV, Márcio Mendonça, Nilla, Netto, Ricardo, Manuel, Catarina e Rosana.

Aos exemplos de amor à Ciência do Solo, professores Wenceslau e Sebastião.

Ao coordenador do curso professor José Ricardo e ao professor Jean Kleber, por todo apoio nos momentos mais difíceis.

Aos amigos de tantas caminhadas, Edivânio, Ana Paula Boschini e Fabiana.

À professora Marilusa, e aos professores Tairone e Fagioli pelas palavras de apoio e incentivo na fase final desse trabalho.

Aos queridos alunos da Agronomia.

À banca por todas as contribuições que certamente tornarão esse trabalho melhor.

DEDICATÓRIA

*A quem não me julgou,
apenas respeitou minhas escolhas!*

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO GERAL	01
1.1. Objetivo Geral	02
1.2. Hipóteses	02
2. REVISÃO DE LITERATURA	03
2.1. CERRADO	03
2.1.1 Aspectos Gerais	03
2.2. MACAÚBA (<i>Acrocomia aculeata</i>)	05
2.3. QUALIDADE DO SOLO (QS)	08
2.3.1. Indicadores de Qualidade do Solo	09
2.3.1.1. Microbiológicos	10
A. Carbono Microbiano (Cmic)	12
B. Respiração Basal (RB)	13
C. Quociente Metabólico (qCO ₂)	14
D. Quociente Microbiano (qMic)	15
2.3.1.2. Químicos	16
A. Matéria Orgânica do Solo (MOS)	16
B. Nitrogênio Total (NT)	17
C. Relação entre Carbono e Nitrogênio (C:N)	17
D. Estoques de Carbono e Nitrogênio no Solo	18
2.3.1.3. Físicos	24
A. Densidade do solo (Ds)	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
3. CAPÍTULO 1. EFEITO DA VARIAÇÃO SAZONAL E ESPACIAL NOS ATRIBUTOS BIOLÓGICOS E QUÍMICOS DE UM GLEISSOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS	40
3.1. INTRODUÇÃO	41
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.4. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

4. CAPÍTULO 2. VARIAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE UM SOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS NO CERRADO	64
4.1. INTRODUÇÃO	65
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	67
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.4. CONCLUSÕES	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
5. ANEXOS	97
A. FITOFISIONOMIAS DO BIOMA CERRADO	97
B. AMOSTRAGEM DA ÁREA DE ESTUDO	98
C. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	99

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. EFEITO DA VARIAÇÃO SAZONAL E ESPACIAL NOS ATRIBUTOS BIOLÓGICOS E QUÍMICOS DE UM GLEISSOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS

FIGURA 1 - Precipitação média mensal no período do estudo observacional (janeiro de 2010 a dezembro de 2010), no município de Planaltina de Goiás, Goiás. Fonte: ANA, 2013. 43

FIGURA 2 - Carbono microbiano (Cmic) e quociente metabólico (qCO_2) na camada 0 a 10 cm, a 50, 150 e 250 cm de distância em relação ao estipe das macaubeiras no período chuvoso e seco. 52

FIGURA 3 - Efeito espacial do nitrogênio total (NT) na camada 0 a 10 cm, a 50, 150 e 250 cm de distância em relação ao estipe das macaubeiras no período chuvoso e seco. 56

CAPÍTULO 2. VARIAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE UM SOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS NO CERRADO

FIGURA 1 - Densidade do solo em profundidade a três distâncias do estipe de macaubeiras. 85

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 1. EFEITO DA VARIAÇÃO SAZONAL E ESPACIAL NOS ATRIBUTOS BIOLÓGICOS E QUÍMICOS DE UM GLEISSOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS

TABELA 1 - Valores de F da análise de variância para carbono microbiano (Cmic); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic); matéria orgânica (MOS), nitrogênio total (NT) e relação C:N, na camada 0 - 10 cm de um Gleissolo, em épocas contrastantes a diferentes distâncias em relação ao estipe de macaubeiras nativas. 47

TABELA 2 - Comparação das diferenças entre as médias dentro de cada distância para as variáveis, carbono microbiano (Cmic); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic); matéria orgânica (MOS), Nitrogênio total (NT) e relação C:N, na camada 0 - 10 cm de um Gleissolo sob macaubeiras nativas. 47

TABELA 3 - Comparação das diferenças entre as médias dentro de cada época (verão e inverno) para as variáveis, carbono microbiano (Cmic); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic); matéria orgânica (MOS), Nitrogênio total (NT) e relação C:N, na camada 0 - 10 cm de um Gleissolo sob macaubeiras nativas. 49

CAPÍTULO 2. VARIAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE UM SOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS NO CERRADO.

TABELA 1 - Valores de F da análise de variância para carbono microbiano (Cmic); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic); matéria orgânica (MOS), nitrogênio total (NT) e relação C:N, do solo sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas. 71

TABELA 2 - Carbono microbiano (Cmic), quociente microbiano (qMic) e nitrogênio total (NT) do solo sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas. 71

TABELA 3 – Comparação dos efeitos diretos sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas para a respiração basal, quociente metabólico, matéria orgânica e relação C:N do solo. 72

TABELA 4 – Estoque total de carbono orgânico (ET_{Corg}) e nitrogênio total (ET_{NT}), na camada 0 a 30 cm, e massa seca da serapilheira (Ms) sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras nativas. 81

TABELA 5 - Valores de F da análise de variância para densidade do solo (g cm⁻³), sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas. 83

TABELA 6 – Densidade do solo (Ds) (g cm⁻³) sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas. 84

VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DE QUALIDADE DO SOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS NO CERRADO

RESUMO

Diante do potencial de exploração econômico da macaúba em áreas de Cerrado é necessário o estudo da qualidade do solo sob esse sistema para monitorar e controlar possíveis impactos que causem a degradação ambiental. O monitoramento da qualidade do solo envolve o uso de indicadores na coleta de informações a respeito das funções do solo, as quais são representadas por propriedades físico-químicas e processos biológicos que interagem entre si. Diante disso, em estudos sobre qualidade do solo em ambientes nativos é comum o uso de um conjunto mínimo de atributos capazes de detectar modificações no sistema. Ainda não existem cultivos comerciais de macaubeiras em franca produção e os estudos sobre comportamento de atributos do solo sob áreas com macaubeiras é relevante, pois com a demanda por óleo vegetal para fabricação de biocombustível está ocorrendo uma exploração extrativista de maciços nativos de macaubeiras sem o monitoramento da qualidade ambiental. O estudo de atributos relacionados a funções do solo pode contribuir para a sustentabilidade do processo de produção de óleo vegetal a partir do coco-macaúba. Objetivo deste trabalho foi estudar as alterações nos atributos biológicos (carbono microbiano; respiração basal; quociente metabólico e microbiano); químicos (matéria orgânica, nitrogênio total, relação C:N, estoques de C e N) em função da variação sazonal e espacial, em um Gleissolo sob macaubeiras nativas, no Cerrado. O estudo observacional foi realizado na região de Planaltina de Goiás, na Fazenda Agropecuária Santa Fé. Foram selecionadas dez árvores em uma mata com macaubeiras nativas no bioma cerrado. A coleta de solo foi realizada nas camadas de 0 – 10 cm; 10 – 20 cm; 20 – 30 cm de profundidade, sob uma linha horizontal, imaginária, traçada a partir da base do estipe das macaubeiras. As amostras de solo foram coletadas a 50, 150 e 250 centímetros de distância do estipe da palmeira, durante o período chuvoso (março de 2010) e seco (julho 2010). Para a avaliação estatística das variáveis observadas, utilizou-se um modelo misto. As médias das variáveis observadas foram submetidas a testes para verificar se seguiam a distribuição normal, e para verificar a homogeneidade de variâncias. Em seguida, os dados foram submetidos ao teste F e as médias foram comparadas pelo teste t. Os atributos possuem comportamentos diferenciados em relação à coleta em épocas contrastantes e a diferentes profundidades e distâncias em relação ao estipe das macaubeiras.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade. *Acrocomia aculeata*. Indicadores microbiológicos e físico-químicos. Matéria orgânica. Estoques de C e N. Biodiesel.

*SPATIAL AND SEASONAL VARIATIONS BY THE ATTRIBUTES OF SOIL QUALITY
UNDER NATIVE MACAUBA PALMS IN THE CERRADO*

ABSTRACT

Given the potential for economic exploitation of macauba palm in Cerrado areas is necessary to study soil quality under such a system to monitor and control potential impacts that cause environmental degradation. The soil quality monitoring involves the use of indicators in collecting information about soil functions, which are represented by physico-chemical and biological processes that interact. Therefore, in studies on soil quality in native environments it is common to use a minimal set of attributes capable of detecting changes in the system. There are no commercial cultivation of macauba palms in full production and studies on the behavior of soil under areas with macauba palms is relevant, since the demand for oil for biofuel production is occurring extractive exploitation of massive native macauba palms without monitoring environmental quality. The study attributes related to soil functions can contribute to the sustainability of the production of oil from coco-macauba. Aim of this work was to study alterations in the biological (microbial carbon, basal respiration and microbial metabolic quotient), chemical (organic matter, total nitrogen, C: N ratio, C and N stocks) due to seasonal and spatial variability, in a Gleysol macaubeiras under native macauba palms in the Cerrado. This observational study took place in Santa Fé Agropecuaria farm, in the region of Planaltina de Goias, State of Goias. Ten trees were selected from a native forest containing macauba palms. Soil samples were taken at depths of 0 - 10 cm; 10 -20 cm and 20 – 30 cm, from a horizontal imaginary line, drawn from the macauba`s palm trunk. Soil samples were taken from a 50, 150 and 250 cm distance from the trunk, during the wet summer (March, 2010) and the dry winter (July, 2010). The mixed model was used in order to evaluate the observational study. The observational means were submitted to testing to evaluate if their values followed a normal distribution and to test homogeneity of variance. Subsequently, data were submitted to the F-test and the means were compared using the t-test. The attributes have different behaviors regarding collection in different seasons and at different depths and distances from the stem of macaubeiras.

KEY-WORDS: Sustainability. *Acrocomia aculeata*. Indicators microbiological and physico-chemical indicators. Organic matter. Stocks of C and N. Biodiesel.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O lançamento do Programa Brasileiro de Biocombustíveis pelo governo nacional em 2002 teve como principal meta desenvolver a tecnologia de produção do biodiesel, visando diminuir a dependência do petróleo, reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa e gerar emprego e renda, principalmente pelo estímulo da agricultura familiar. Atualmente a produção de biodiesel no Brasil ainda pode ser considerada incipiente, quando se leva em conta a demanda por este produto (MIRAGAYA, 2005). No ano de 2012, a produção brasileira foi de 2,5 bilhões de litros de biodiesel.

O Brasil possui clima propício para o cultivo de uma grande variedade de plantas oleaginosas, nativas ou exóticas, que podem ser adaptadas ao processo de produção de óleo. Entre essas espécies, a macaúba (*Acrocomia aculeata*) se destaca por ser uma palmeira produtiva e nativa de regiões semi-áridas, podendo ser recomendada para agricultores destas áreas.

A propriedade oleaginosa dos frutos torna esta palmeira promissora para a produção de biocombustível, pois ela apresenta uma produtividade média em torno de quatro mil quilos por hectare ano.

Entretanto um estudo sobre o efeito dos impactos do sistema produtivo dessa palmeira no intuito de evitar o depauperamento do solo que leva à queda de produção precisa ser realizado, pois ainda existem poucas informações sobre o comportamento edafoclimático em áreas com essa oleaginosa.

A agricultura sustentável tem o objetivo de proteger os recursos naturais, manter ou aumentar a produtividade, reduzir os riscos, garantindo qualidade de vida para a presente e futuras gerações.

Nesse sentido é importante manter a qualidade do solo, já que é dele que os vegetais retiram a água e os nutrientes necessários para o seu crescimento, desenvolvimento e produção.

A qualidade do solo é o resultado de contínuos processos de degradação e conservação e representa a contínua capacidade do solo de funcionar como um ecossistema vital. Um balanço único de componentes biológicos, químicos e físicos contribui para a manutenção da qualidade do solo (NILSEN; WINDING, 2002).

Os microrganismos do solo e suas comunidades estão continuamente mudando e se adaptando às alterações ambientais. A dinâmica natural desse grupo faz deles indicadores potencialmente sensíveis para avaliar as mudanças no solo resultantes de diferentes sistemas de produção.

O desafio é identificar parâmetros do solo mensuráveis que possam ser usados para avaliar as práticas de manejo do solo para um determinado local e sistema produtivo. Entender e conhecer a qualidade do solo possibilita manejá-lo de maneira sustentável.

Portanto diante do potencial de exploração econômico da macaúba nas áreas do Cerrado necessário que se faça uma abordagem sobre o estudo da qualidade do solo sob esse sistema para monitorar e controlar possíveis impactos que causem a degradação do solo.

1.1. Objetivo Geral

Estudar a variabilidade sazonal e espacial de atributos biológicos, estoque de carbono e nitrogênio totais e densidade do solo em um sistema com macaubeiras nativas.

1.2.Hipóteses

H₁: Os teores do carbono microbiano (C_{mic}); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (q_{Mic}); matéria orgânica (MOS), nitrogênio total (NT) e relação C:N alteram em função da variação sazonal e espacial.

H₂: Atributos microbiológicos, estoques de carbono, nitrogênio e a densidade do solo se alteram em função das profundidades e distâncias em relação ao estipe de macaubeiras nativas no Cerrado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. CERRADO

2.1.1. Aspectos Gerais

O Cerrado está localizado na porção central do Brasil e ocupa 24 % da superfície do país, em torno de 204 milhões de hectares. Apresenta-se como a segunda maior formação vegetal brasileira e é a savana tropical mais rica do mundo em biodiversidade (FALEIRO et al., 2008).

O clima predominante neste bioma é o tropical sazonal, com duas estações bem definidas: a seca que dura de 4 a 7 meses (abril a setembro) e a chuvosa concentrando-se na primavera e verão (outubro a março). Na estação chuvosa, as precipitações variam de 720 a 2.000 mm, e no geral, no Distrito Federal a precipitação varia entre 1.200 e 1.800 mm, com temperatura média anual em torno de 22-23 °C (RESCK et al., 2008a).

O recurso solo é reflexo da interação entre vários fatores, tais como: clima, geologia, geomorfologia, cobertura vegetal e atividade da fauna. Ecologicamente, os dois principais fatores determinantes da presença das fitofisionomias deste bioma são os solos ácidos, com baixa disponibilidade de nutrientes e muitas vezes alta saturação de alumínio; e o clima tropical estacional (GOEDERT et al., 2008).

No Cerrado há predominância das seguintes ordens: Argissolo, Cambissolo, Gleissolo, Latossolo, Luvisolo (EMBRAPA, 2005). Em síntese, os Latossolos ocupam 46 % da área e apresentam boa qualidade física (elevada permeabilidade, baixa erodibilidade, fácil mecanização e média capacidade de retenção de água), entretanto possui fortes limitações como provedor de nutrientes para as plantas (GOEDERT et al., 2008).

Os Gleissolos são solos hidromórficos presentes em ambientes de drenagem imperfeita, mal drenados a muito mal drenados, quase sempre apresentam camada de matéria orgânica mal decomposta sobre camada acinzentada (horizonte glei), em consequência do ambiente de oxi-redução. Estão localizados em baixadas próximas às drenagens e o lençol freático quase sempre está próximo à superfície e pode ocorrer acúmulo de água durante todo o ano ou na maior parte dele. Apresentam limitações ao uso agrícola, principalmente, em relação à limitação de oxigênio (pelo excesso de água), à baixa fertilidade e ao impedimento à mecanização (REATTO et al., 2004).

A heterogeneidade espacial do Cerrado, onde diversas fitofisionomias alternam-se na paisagem, está relacionada à variação dos solos e de suas características, tais como composição química, profundidade e tipo de drenagem (LOPES; COX, 1977).

A vegetação desse bioma apresenta estratégias de adaptação à seca, como raízes alcançando profundidades superiores a 10 m, germinação das sementes na época das chuvas e crescimento radicular pronunciado nos primeiros estádios de desenvolvimento da planta (SANTOS et al., 2004). São descritos onze tipos principais de vegetação para o bioma Cerrado, enquadrados em formações florestais (Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão), savânicas (Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda) e campestres (Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre) (RIBEIRO; WALTER, 1998).

O bioma Cerrado passou por um rápido processo de urbanização com ocupação agropecuária desordenada. Além da degradação ambiental provocada pela remoção da cobertura natural nativa, a agricultura no Cerrado também é responsável pela liberação de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, principalmente em decorrência das queimadas e da produção de carvão vegetal na etapa de preparação da terra para cultivo. Outro ponto a ser destacado é o risco de erosão e empobrecimento do solo associado ao monocultivo. O processo erosivo do solo é uma ameaça aos recursos hídricos da região, uma vez que, além de promover o assoreamento dos rios, pode levar até eles uma grande quantidade de produtos químicos presentes em corretivos, fertilizantes e agrotóxicos utilizados na agricultura (KLINK; MACHADO, 2005).

O solo é um recurso natural importante para a sustentabilidade ambiental, porque além de sustentar a produção vegetal, exerce funções na ciclagem e estoque de carbono e nutrientes; regula e compartimentaliza o fluxo de água; estoca e promove a ciclagem de elementos na biosfera e atua como tampão ambiental na degradação de substâncias prejudiciais ao ambiente (ESWARAN et al., 2001). Contudo, o uso e manejo inadequados desse recurso prejudicam suas funções e promove sua degradação química, física e biológica (GIESTEIRA, 2011).

O solo e a água são recursos não renováveis e finitos, distribuídos de forma desigual nas regiões geográficas. A degradação do solo é um problema evidente e intenso, particularmente nas regiões tropicais e subtropicais, em decorrência do progressivo aumento da pressão demográfica, do cultivo de terras marginais, com o uso e manejo incorreto do solo, que leva ao esgotamento de sua fertilidade (LAL, 2004).

O manejo agrícola é considerado sustentável quando a qualidade dos recursos como solo, ar e água é mantida ou melhorada, e, no caso do solo, a qualidade depende da manutenção e melhoria de seus atributos físicos, químicos e biológicos, bem como de sua capacidade de produzir alimentos e fibras (LOURENTE et al., 2011).

Os solos sob Cerrado, em geral, apresentam características físicas favoráveis à agricultura. Esta região está sob plena expansão agrícola com cerca de 80 milhões de hectares sob diferentes usos, sendo que as pastagens cultivadas e as culturas agrícolas ocupam respectivamente 26,5 % e 10,5 % desse bioma (GUARESCHI et al., 2012).

A mudança da vegetação natural para sistema de exploração agropecuária provoca alterações nos atributos do solo (CARNEIRO et al., 2009). A derrubada e queima da vegetação nativa, seguida do cultivo do solo no processo de conversão do Cerrado em sistemas de cultivo, reduzem o estoque de carbono (C) do solo e aumentam a emissão de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera (FRANCHINI et al., 2007; SMITH et al., 2008).

2.2. MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*)

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lood. ex Mart.) é representada por palmeiras arborescentes, perenifólias, heliófitas, monóicas, cujos estipes podem atingir acima de 15 metros de altura com 20 a 30 centímetros de diâmetro (LORENZI, 1992).

Esta frutífera é nativa de florestas tropicais, tipicamente brasileira e com ampla distribuição geográfica. No Brasil, ocorre nos estados do Ceará, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Goiás e por toda região Sul (LORENZI, 1992).

Esta palmeira é citada como a única espécie de porte arbóreo de áreas de pastagens (SCARIOT et al., 1995), ocorrendo principalmente em florestas latifoliadas semidecíduas (LORENZI, 1992). As informações sobre as necessidades edáficas da espécie são conflitantes. A espécie é indicadora de solos mesotróficos do Brasil Central Ratter et al. (1996); entretanto Motta et al. (2002) relatam que a ocorrência de macaúba acompanha áreas de solos com maior fertilidade natural e vegetação primitiva de fisionomia florestal, e neste ambiente a espécie avança como pioneira evitando extremos de deficiência de nutrientes e água. Por outro lado, esta palmeira ocorre no Estado de São Paulo em solos pobres, cobertos pelo Cerrado (MARISOLA FILHO, 2009).

A macaúba apresenta ampla utilidade e mais recentemente seu fruto tem despertado grande interesse sócio-econômico por sua capacidade de produção de óleo vegetal, considerando-se que ela é citada como uma das principais fontes deste óleo no Brasil. Em meio a suas várias utilidades são relatados usos medicinais, alimentícios, cosméticos, entre outros. Entretanto, é a propriedade oleaginosa dos frutos de macaúba que vem atraindo mais atenção. Esta palmeira tem a segunda maior produtividade entre as plantas oleaginosas, com produção de 1500 a 5000 kg de óleo por hectare ao ano, o que a torna uma espécie com potencial para a produção de biodiesel, pois além de sua produtividade, ela se mantém produtiva por mais de 100 anos (MARISOLA FILHO, 2009).

O Brasil possui clima propício para o cultivo de plantas oleaginosas e mesmo que a macaúba ocupe a segunda posição no rendimento de óleo vegetal, apresenta a vantagem de ser uma alternativa para outras regiões brasileiras; em contraposição ao dendê (*Elaeis guineensis*) que é restrito a regiões quentes e úmidas como a Amazônia e o sul da Bahia (MOURA, 2007).

A utilização do óleo de macaúba para a produção de biodiesel com a participação da agricultura familiar elevaria a demanda pelo plantio dessa cultura e contribuiria para promover o desenvolvimento sócio-econômico, por meio de programas de desenvolvimento regional, gerando emprego e renda, contribuindo para a redução da miséria e freando correntes migratórias internas, promovendo a fixação do homem ao campo (BATISTA, 2006).

A produção de biodiesel em usinas gera subprodutos como a glicerina, farelo e tortas que se apresentam como fatores limitantes a essa atividade (TEIXEIRA, 2005). Porém, no caso da macaúba, as tortas obtidas da polpa da amêndoa têm alto valor energético, podendo ser usadas como ração para animais domésticos. Além do uso do fruto para a obtenção de óleo, ração e alimentos, o endocarpo pode ser utilizado na fabricação de carvão (MARISOLA FILHO, 2009).

Um dos problemas da macaúba é seu longo período juvenil, já que a espécie pode demorar até sete anos para produzir. No entanto, a macaúba ocupa diversos ambientes na paisagem, como margens de rodovias, cultivos em consórcio com culturas anuais, perene e pastagens, áreas degradadas ou em processo de recuperação (MOTA et al., 2011). Portanto, o consórcio apresenta-se como possibilidade de sustento dos produtores até o amadurecimento da palmeira.

O solo apresenta como uma de suas funções o fornecimento de água e nutrientes aos vegetais, além de ser base para a sua sustentação, por isso o planejamento de sistemas de produção devem considerar a capacidade de uso do solo no intuito de promover seu uso sustentável.

Em seu estado natural, o solo encontra-se coberto pela vegetação, que o protege da erosão e contribui para manter o equilíbrio entre fatores de sua formação e aqueles que promovem sua degradação. O rompimento dessa relação provoca alterações biológicas, químicas e físicas, as quais se não forem monitoradas e controladas, levam à queda de produtividade e à degradação do ecossistema (SIQUEIRA et al., 1994).

Diante do potencial de exploração econômico da macaúba nas áreas do Cerrado, é necessário o estudo da qualidade do solo sob esse sistema para monitorar e controlar possíveis impactos que causem a sua degradação.

O solo é um corpo dinâmico, vivo e natural que determina funções fundamentais nos ecossistemas terrestres. Os componentes do solo incluem a matéria mineral inorgânica (areia, sedimentos e partículas de argila), matéria orgânica, água, gases, e organismos vivos e há um contínuo intercâmbio de moléculas e íons entre as fases sólida, líquida e gasosa que são mediadas pelos processos físicos, químicos e biológicos (DORAN; PARKIN, 1994).

O plantio de macaubeiras é uma alternativa para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (DIAS et al., 2011). E como para a produção de biodiesel são utilizados apenas seus frutos, o carbono continua fixado nas raízes, estipe e folhas, e com isso o estoque de carbono fixado pela palmeira é maior se comparado às espécies agrícolas convencionais que são colhidas anualmente (MOTA et al., 2011). Recomenda-se o consórcio de palmeiras oleaginosas com pastagem visando aumentar o estoque de carbono no solo e diminuir a emissão de gás carbônico para atmosfera (DIAS et al., 2011).

Uma das metas do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) é recuperar 15 milhões de hectares entre os anos de 2010 e 2020. Nessas linhas de ação, atenção especial tem ocorrido com o intuito de promover incentivos para a recuperação de áreas degradadas (DIAS et al., 2011).

Para sistemas Silvopastoris (SSP), a macaúba é uma espécie com potencial, devido aos múltiplos usos que possibilita diversificar a produção de bens e serviços ambientais (DIAS et al., 2011).

Características botânicas e morfológicas da macaúba favorecem a captação de água de maneira eficiente. O formato da copa é semelhante a um funil, e os folíolos são em formato de calhas, capazes de direcionar a água da chuva interceptada pelas folhas, assim como as bainhas se assemelham às calhas, que são ainda maiores e são direcionadas para o estipe. A presença de espinhos e de pêlos aumentam a área de superfície de captação de água, mantendo a umidade e a temperatura microclimática. No estipe junto às bainhas forma-se um emaranhado de fibras semelhantes ao xaxim, compondo mais uma eficiente estratégia de captação e retenção de água. Essa característica específica de retenção de água da chuva de maneira eficiente possibilita o uso dessa palmeira em programas de recuperação de áreas com pastagens degradadas (DIAS et al., 2011).

A macaúba apresenta um perfil desejável, uma vez que é uma espécie perene, cuja morfologia favorece o escoamento de água da chuva pelo tronco ou estipe, diminuindo a energia cinética da água. Esta palmeira forma uma barreira física contra o escoamento superficial de água livre, além de proteger o solo. O cultivo dessa espécie em consórcio com o pasto pode trazer ganhos ambientais diminuindo a quantidade de água escoada pela superfície do solo (DIAS et al., 2011).

2.3. QUALIDADE DO SOLO (QS)

Um solo pode ser considerado com boa qualidade ou de qualidade inferior, dependendo do contexto em que se encontra. É importante considerar a atividade que se desenvolve nele, os elementos que se relacionam e como estes são afetados. As interações que ocorrem dentro do sistema solo devem ser compreendidas para definir seu estado de qualidade. Por exemplo, os solos do Cerrado que, em geral, são muito ácidos, com altos teores de alumínio e baixa fertilidade, em condições naturais dificultam o bom desenvolvimento da produção agrícola, entretanto, apresentam condições favoráveis para o desenvolvimento da vegetação nativa (PALMIERI; LARACH, 2004). Estes solos, sob vegetação natural, mostram-se estáveis e evidenciam um estado de qualidade que permite sustentar a vegetação presente e manter a estabilidade entre os constituintes deste ambiente. No entanto, a incorporação de áreas nativas ao processo de produção agropecuária no Cerrado pode romper o equilíbrio natural dos solos deste bioma.

Doran e Parkin (1994) definiram a qualidade do solo (QS) como a capacidade de funcionamento do solo, dentro do ecossistema e das limitações de uso, de maneira a sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e favorecer a manutenção e o crescimento de plantas, de animais e do homem. Essa definição engloba a questão da sustentabilidade e alcança a preocupação com a produção de alimentos saudáveis considerando a preservação do ambiente e da vida no planeta.

As definições são baseadas na utilização do solo pelo homem para fins agrícolas e estão relacionadas com as funções do solo em ecossistemas naturais e agrícolas. Nesse sentido Kelting et al. (1999) relacionam cinco atributos essenciais para a manutenção da produtividade agrícola: a capacidade do solo em promover o crescimento das raízes de plantas, o suprimento de água e a transformação de nutrientes, a troca eficiente de gases na interface solo-atmosfera e a promoção da atividade dos macro e microrganismos do solo.

O entendimento do conceito de qualidade do solo compreende o equilíbrio entre os condicionantes geológicos, hidrológicos, químicos e biológicos do solo (SPOSITO; ZABEL, 2003). A busca da qualidade do solo deve ser por meio de um bom manejo, que considere seu potencial de produção, sustentabilidade e impacto ambiental.

O sucesso da conservação e do manejo para manter a qualidade do solo depende da compreensão de como os mesmos respondem às práticas e usos agrícolas ao longo do tempo. Para serem úteis a estas práticas, os métodos para quantificar a qualidade do solo devem acessar as mudanças nos atributos selecionados ao longo de um período prescrito de tempo, visando a garantir a identificação das melhores estratégias de manejo (ARAÚJO, 2008).

A qualidade do solo, sendo um estado funcional complexo, não pode ser medida diretamente, mas pode ser inferida a partir de propriedades do solo designadas como propriedades indicadoras da qualidade do solo (ISLAM; WEIL, 2000).

2.3.1. Indicadores de Qualidade do Solo

Indicadores de qualidade do solo são propriedades mensuráveis (quantitativas ou qualitativas) do solo ou da planta relacionadas a um processo ou atividade e que permitem caracterizar, avaliar e acompanhar as alterações ocorridas em um ecossistema (ARSHAD; MARTIN, 2002).

Os atributos funcionam como indicadores do estado real do solo, e podem fornecer diversas informações; os atributos de natureza biológica refletem a atividade

dos organismos vivos do solo. Os de natureza química permitem estimar a reserva de nutrientes disponíveis para as plantas. E os atributos de natureza física permitem avaliar a agregação das partículas e a compactação do solo (GOEDERT, 2005).

Os indicadores são os próprios atributos do solo, que, por meio da ação dos diversos elementos do agroecossistema sofrem modificações que podem contribuir com a melhoria ou causar danos aos componentes do solo. As propriedades físicas, químicas e biológicas poderão informar sobre a qualidade do solo. Então, o monitoramento destas propriedades é importante para adequar o manejo, principalmente em áreas mais suscetíveis à degradação, como nos solos do Cerrado. O acompanhamento da evolução dos atributos do solo serve para avaliar a sustentabilidade das práticas agrícolas e estabelecer parâmetros que visem à conservação do solo (FIALHO et al., 2006).

Entretanto, cabe ressaltar que a escolha dos indicadores depende da finalidade a que se propõe a utilização do solo, e está relacionada às características intrínsecas de cada ambiente.

O desafio dos estudos sobre sustentabilidade é com relação ao desenvolvimento de métodos para a avaliação da qualidade do solo e do ambiente sob interferência do homem. Há um esforço multidisciplinar tentando quantificar diferentes atributos que estão relacionados com a sustentabilidade, traduzindo-os na forma de indicadores de qualidade do solo (MELLONI et al., 2008).

Os critérios para seleção destes indicadores devem se relacionar com a sua utilidade em explicar os processos de um ecossistema, integrar propriedades físicas, químicas e biológicas, ser sensível ao manejo e às variações climáticas e ser útil e acessível aos especialistas em agricultura, produtores, ambientalistas e gestores públicos (DORAN; PARKIN, 1994).

2.3.1.1. Microbiológicos

A avaliação de atributos biológicos do solo é adequada à maioria dos critérios para a seleção de um indicador de qualidade (DORAN; ZEIS, 2000). A capacidade de responder rapidamente a mudanças no ambiente do solo derivadas das alterações no manejo justifica o uso de microrganismos e processos microbiológicos como indicadores de qualidade de solo (TÓTOLA; CHAER, 2002).

A porção viva da matéria orgânica (MOS) presente no solo varia de 1 a 5 % e, desta fração, entre 60 e 80 % correspondem aos microrganismos. Dessa forma, a maior parte da matéria orgânica viva presente no solo é protoplasma microbiano responsável

pela atividade biológica (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006) e pelo fluxo e rápida ciclagem de nutrientes no solo (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008). A biomassa microbiana (BMS) é definida como a parte viva da matéria orgânica do solo composta por microrganismos menores que $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$, tais como fungos, bactérias, actinomicetos, leveduras e protozoários. Essa biomassa representa o destino inicial do carbono em transformação no solo, sendo influenciada principalmente pela disponibilidade de carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S). Entretanto, fatores como teor de água no solo, aeração, pH e textura do solo também influenciam o carbono incorporado nas biomoléculas da comunidade microbiana presente no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Por ser a fração ativa da MOS, a biomassa microbiana é mais sensível para aferir alterações no manejo do solo que os teores de carbono orgânico e nitrogênio totais (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008). Além disso, a biomassa microbiana é sensível a mudanças no manejo dos resíduos superficiais em um curto espaço de tempo (GALDOS et al., 2009) e pode ser utilizada como indicador de qualidade ambiental (SCHLOTTER et al., 2003).

Matsuoka et al. (2003) encontraram redução da biomassa microbiana e do teor de matéria orgânica em solo de Cerrado submetidos a cultivos perenes e anuais. Contudo, as reduções nos teores de carbono na BMS foram mais acentuadas que as reduções na matéria orgânica, mostrando que o carbono da BMS é mais sensível à remoção da cobertura vegetal nativa que a parte não viva da MOS. As modificações no carbono microbiano, antes mesmo que os teores de matéria orgânica se alterem, possibilitam que esse atributo do solo seja utilizado como indicador de qualidade. A quantificação da biomassa microbiana e sua atividade ao ser associada a valores de pH, teores de carbono orgânico, nitrogênio total, teor de água e argila, possibilitam uma avaliação sistêmica do manejo empregado e contribuem para se obter índices de aferição de sustentabilidade ambiental (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

Dentre os atributos microbiológicos, destacam-se o carbono da biomassa microbiana e a respiração basal, por serem sensíveis às alterações que ocorrem no solo, tais como manejo e cultivo, além de alterações ambientais, como a umidade (PEREZ et al., 2004). A respiração basal é um indicativo da atividade microbiana do solo e representa o carbono prontamente mineralizável do solo (ALEF; NANNIPIERI, 1995). A avaliação destes atributos, em solos sob vegetação natural, tem sido adotada como alternativa, em estudos que visam a avaliar e monitorar a QS sob uso agropecuário,

quando não se dispõe da definição de parâmetros ou valores dos atributos de QS considerados sustentáveis, para os solos em estudo sob uso antrópico (FRANZLUEBBERS, 2002).

No geral, quando se estuda a comunidade microbiana e sua atividade em solos de Cerrado, espera-se encontrar valores relativamente maiores quando comparados a solos com outros tipos de vegetação mais homogêneas e até mesmo em solos sob culturas, este comportamento é reflexo de uma situação particular para a microbiota do solo sob sistema nativo, que é estimulada pelo fornecimento contínuo de materiais orgânicos com diferentes graus de susceptibilidade à decomposição, originados da vegetação; pela ação da rizosfera e ausência de perturbações decorrentes de atividades antrópica. Além disso, a matéria orgânica incorporada ao sistema favorece as propriedades estruturais do solo, tais como agregação e aeração que refletem positivamente no crescimento da comunidade microbiana do solo (LISBOA, 2009). A presença de resíduos orgânicos sobre o solo, também, implica em menores flutuações de temperatura e umidade, contribuindo para o aumento da biomassa (LOURENTE et al., 2011).

A. Carbono Microbiano (C_{mic})

O carbono da biomassa microbiana do solo (C_{mic}) representa a quantidade de carbono que a biomassa microbiana do solo imobilizou nas suas células. Fatores que afetam a densidade e a atividade dos microrganismos do solo, como o pH e a disponibilidade de substrato, influenciam na decomposição da matéria orgânica e na assimilação de carbono. A biomassa microbiana é influenciada pelo teor de argila dos solos e, além de armazenar nutrientes, o carbono microbiano pode servir como indicador rápido da sensibilidade da microbiota às interferências nos ecossistemas (FIALHO et al., 2006).

Carvalho (2005), em seu estudo para verificar a utilização de atributos bioquímicos como indicadores de qualidade do solo em seis ecossistemas de araucária no Estado de São Paulo, verificou que os valores isolados de carbono da biomassa microbiana não serviram como indicadores precisos e confiáveis da qualidade do solo. Ainda segundo a autora, houve uma tendência geral das Matas Naturais apresentarem os maiores teores de carbono microbiano.

Os teores de carbono microbiano observados em ecossistemas, sob diversas condições edafoclimáticas variam de 200 a 1600 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo (BARETTA et al., 2005;

MALUCHE-BARETTA et al., 2006; FALL et al., 2012). Esta amplitude nos valores do carbono microbiano parece estar associada à heterogeneidade de características existentes nos diversos ecossistemas (CHOROMANSKA; DELUCA, 2001). Portanto, o valor isolado do carbono microbiano não é um indicador tão preciso e confiável para estudar alterações em ecossistemas, a não ser quando também ocorre o monitoramento da biomassa no espaço temporal (CARVALHO, 2005).

B. Respiração Basal (RB)

A respiração é um dos métodos mais antigos para quantificar a atividade microbiana e consiste na produção de CO₂ (C-CO₂) ou consumo do O₂ como resultado dos processos metabólicos de todos os organismos vivos presentes no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Esta atividade metabólica é dependente do estado fisiológico da célula e é influenciada por diversos fatores no solo como a umidade, temperatura, estrutura do solo e disponibilidade de nutrientes (ALEF; NANNIPIERE, 1995); clima, propriedades físicas e químicas e práticas agrícolas (GAMA-RODRIGUES, 2008).

Insam e Domsch (1988) relatam que à medida que uma determinada biomassa microbiana se torna mais eficiente, menos carbono é perdido como CO₂ pela respiração e uma fração significativa de carbono é incorporada à biomassa microbiana. Desta forma, considerando a mesma constituição da comunidade microbiana, uma biomassa “eficiente” teria menor taxa de respiração em relação a uma biomassa “ineficiente” (CARVALHO, 2005).

Carvalho (2005) verificou que a respiração basal mostrou-se sensível para captar alterações ocorridas no ambiente. A autora encontrou uma tendência geral das matas apresentarem baixos valores de respiração e altos valores de carbono microbiano, o que evidencia que as comunidades microbianas destes ecossistemas perdem menos carbono na forma de CO₂ por meio da respiração, e uma fração significativa de carbono está sendo incorporada na constituição da biomassa, sugerindo que as comunidades avaliadas se encontram num estágio de sucessão mais avançado, no qual a retenção e a conservação de nutrientes são maiores (ODUM, 1983), pois a comunidade microbiana utiliza as substâncias orgânicas mais para o seu crescimento do que para a sua manutenção (MADER et al., 2002).

C. Quociente Metabólico (qCO_2)

O quociente metabólico (qCO_2), relaciona a respiração basal com o carbono da biomassa microbiana, e refere-se à quantidade de CO_2 incorporada por grama de biomassa em um determinado tempo. O qCO_2 representa a taxa de respiração específica da biomassa microbiana, sendo importante em estudos que avaliam os efeitos ambientais sobre a atividade microbiana (DE-POLLI; GUERRA, 1997), devido à possibilidade de se quantificar de forma mais clara e com menor variabilidade a atividade microbiana (AQUINO et al., 2005). O qCO_2 pode ser indicador da condição de estresse da biomassa microbiana do solo (BARETTA et al., 2005; MALUCHE-BARETTA et al., 2006)

Esse quociente expressa a energia necessária para a manutenção da atividade metabólica em relação à energia necessária para a síntese da própria biomassa (BARDGETT; SAGGAR, 1994).

Islam e Weil (2000) relatam que o quociente metabólico apresenta comportamento inversamente proporcional à qualidade do solo, portanto aumentos no qCO_2 indicam perda de qualidade do solo.

Valores baixos desse quociente indicam alta atividade específica por unidade de biomassa, e valores altos mostram que a eficiência da atividade microbiana do solo está baixa e que os microrganismos estão sob estresse ambiental (WARDLE; GHANI, 1995), pois uma biomassa eficiente libera menos carbono em forma de CO_2 pela respiração, porém incorpora carbono em sua constituição, aumentando sua massa microbiana (AQUINO et al, 2005).

Tótola e Chaer (2002) afirmam que valores mais elevados de qCO_2 indicam um maior consumo de carbono prontamente mineralizável, elevando as perdas de CO_2 .

Um qCO_2 baixo pode estar correlacionado com uma maior diversidade da comunidade microbiana e uma maior eficiência do uso da energia, pois Mader et al. (2002), em avaliação de 21 agroecossistemas encontraram correlação negativa entre o quociente metabólico e a diversidade microbiana.

Sistemas mais sustentáveis, onde as populações microbianas possuem menor necessidade energética para a sua manutenção, apresentam menores valores de qCO_2 , com menores perdas de carbono para a atmosfera (CHOROMANSKA; DELUCA, 2001). Em áreas onde as populações microbianas se encontram em condições de maior estresse há uma maior taxa de decomposição da matéria orgânica do solo, com maiores perdas de carbono o que compromete a ciclagem de nutrientes (GAMA-RODRIGUES,

2008). Esse comportamento ocorre com mais frequência em solos ácidos, se comparados aos solos neutros; e em sistemas jovens em relação aos estáveis (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

Carvalho (2005), em seu estudo para verificar a utilização de atributos bioquímicos como indicadores de qualidade do solo em seis ecossistemas de araucária no Estado de São Paulo, verificou que o quociente metabólico mostrou-se sensível para captar alterações ocorridas no ambiente. A autora relata que os valores encontrados nos ecossistemas avaliados foram baixos, mesmo sendo solos ácidos, entretanto tal resultado era esperado porque foi observado um maior armazenamento de nutrientes pela biomassa com menor perda de C-CO₂ para o ambiente indicando que estes ecossistemas estão num estágio mais avançado de sucessão, onde o acúmulo de energia retido no sistema é maior (ANDERSON; DOMSCH, 1990).

D. Quociente Microbiano (qMic)

A relação entre o carbono microbiano (C_{mic}) e o carbono orgânico (C_{org}) é chamada de quociente microbiano (qMic). Essa relação expressa a quantidade de carbono imobilizado na biomassa microbiana (SILVA, 2001), mede a eficiência da biomassa microbiana em utilizar o carbono orgânico do solo (FRANCHINI et al., 2007), fornece uma medida da qualidade da matéria orgânica (FIALHO et al., 2006); além de ser indicadora sensível das perturbações que ocorrem no solo (BARETTA et al., 2005).

Anderson e Domsch (1993) sugeriram um intervalo entre 0,3 a 7 % para a relação entre o carbono microbiano e orgânico do solo. De acordo com esses autores uma maior relação C_{mic}:C_{org} representa uma maior ciclagem de nutrientes e um menor acúmulo de carbono.

Um alto valor dessa relação está associado a uma matéria orgânica de boa qualidade; entretanto em circunstâncias de desequilíbrio ambiental a capacidade de utilização de C é diminuída e o valor do qMic tende a diminuir (WARDLE, 1992). Maiores valores para essa relação indicam um sistema em equilíbrio (JENKINSON; LADD, 1981).

Em ecossistemas estáveis há tendência de aumento da atividade microbiana e o qMic tende a crescer até atingir um equilíbrio (POWLSON et al., 1987), portanto em ambientes em estado de equilíbrio o valor desta relação pode ser usado para avaliar o quanto um solo se encontra degradado.

2.3.1.2. Químicos

Os indicadores químicos são agrupados em variáveis relacionadas com o teor de matéria orgânica do solo, acidez do solo, o teor de nutrientes, elementos fitotóxicos (alumínio) e determinadas relações (saturação por bases, alumínio e C:N). A determinação do pH, da capacidade de troca catiônica e de nutrientes torna-se essencial para analisar aspectos químicos de qualidade do solo, uma vez que fornecem uma medida da habilidade do solo em suprir nutrientes (MELLONI et al., 2008).

A. Matéria orgânica do Solo (MOS)

A matéria orgânica do solo (MOS) refere-se a todos os elementos que possuem carbono orgânico no solo, incluindo os microrganismos vivos e mortos, animais parcialmente decompostos e produtos de sua decomposição, resíduos de plantas, e substâncias orgânicas microbiologicamente e/ou quimicamente alteradas. Esse conceito é muito amplo, gerando uma composição extremamente complexa, em função da mistura de diferentes compostos e grande variedade de processos naturais de degradação e síntese que ocorrem na sua formação. Em geral, na grande maioria dos solos, o teor de matéria orgânica varia de 0,5 a 5,0 % nos horizontes minerais superficiais (SANTOS, 2007).

A dinâmica da MOS é influenciada pelo clima, temperatura, cobertura vegetal, tipo de solo, seu uso e manejo. Estes fatores interferem nas propriedades físicas e químicas da matéria orgânica, e regulam a quantidade de MOS, composição e atividade das comunidades decompositoras, incluindo os processos de mineralização, lixiviação e erosão (USSIRI; JOHNSON, 2003).

A MOS, que dá ao solo sua cor escura, é composta principalmente pelo húmus (BAIRD, 2005), que passa por dois processos de transformação básicos e opostos, mineralização e humificação (LIMA, 2003).

O conteúdo e a composição são consequência de vários fatores tais como: o tipo de vegetação, a topografia, o clima e o tempo (idade), onde o acúmulo ou a destruição sofrem o efeito da atividade dos microrganismos, os quais são afetados pelas condições de umidade, aeração, pH e temperatura, além dos nutrientes e fontes energéticas (SANTOS, 2007).

A matéria orgânica interfere em diversas propriedades do solo, tais como: adsorção de cátions e ânions, auxilia na estabilização da estrutura do solo, retenção de água, influencia diretamente na cor, reduz a plasticidade e provoca sensível diminuição

na compactação, por aumentar a porosidade do solo. As quantidades de matéria orgânica presentes no solo variam com o clima, tipo de vegetação ou cobertura, textura e regime de saturação hídrica do solo e ainda, de acordo com o manejo (SANTOS, 2007).

O aumento do estoque de matéria orgânica em sistemas conservacionistas influencia a qualidade do solo (BALESDENT et al., 2000). No solo, a matéria orgânica também é uma importante fonte de nitrogênio (LUCHESE et al., 2002). Devido à atividade biológica, o solo passa a conter, por meio da MOS, dois importantes elementos não presentes no material de origem do solo, carbono e nitrogênio. A MOS, possui em média cerca de 58 % de C, e é responsável pelas propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo (SANTOS, 2007).

B. Nitrogênio Total (NT)

Entre os indicadores de qualidade do solo o nitrogênio total (NT) desempenha um papel fundamental por sua relação com a capacidade produtiva do solo. A dinâmica do nitrogênio no solo é semelhante à do carbono, pois 95 % deste elemento se encontra na forma orgânica, e uma pequena proporção está sob a forma mineral (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

O nitrogênio (N) está entre os elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas, por ser exigido em grandes quantidades pelos vegetais, este nutriente pode limitar a produtividade da maioria dos sistemas agrícolas (REIS et al., 2006). Além disso, o N é um elemento sensível a modificações das condições ambientais, como consequência dos inúmeros processos químicos e biológicos que controlam a sua disponibilidade e perda no sistema solo-planta-atmosfera (MALUCHE, 2004).

C. Relação entre Carbono e Nitrogênio (C:N)

A relação C:N é um importante indicador da decomposição da MOS, e fornece informações sobre os nutrientes essenciais para a atividade dos microrganismos do solo (SANTOS, 2007). Os valores para a relação C:N variam entre 10 e 15/1 em solos tropicais não revolvidos (STEVENSON et al., 1994).

Há uma tendência em decréscimo na relação C:N no perfil de solo, com o aumento da profundidade. De acordo com as características do solo, a diminuição na relação C:N com o aumento da profundidade no perfil pode ser mais ou menos

acentuada, dependendo do solo (COSTA, 2004). A relação C:N afeta a disponibilidade de nitrogênio disponível no solo (SANTOS, 2007).

D. Estoques de Carbono e Nitrogênio no Solo

O estoque de carbono do solo é uma estimativa da massa total de carbono de um solo, considerando os teores de carbono, a profundidade (espessura) do solo e sua densidade. Geralmente é quantificado em base volumétrica expressa em Mg C ha⁻¹, sendo 1 Mg = 1 megagrama ou 1 tonelada métrica (MACHADO, 2005). Os estoques de carbono estão diretamente associados à dinâmica espaço-temporal das fitofisnomias, assim como estão relacionados às alterações ambientais (FRANÇA, 2011).

O estudo do carbono é importante devido à sua estreita relação com as mudanças climáticas globais, visto que o efeito estufa é causado, principalmente, pela emissão de CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), CFCs (clorofluorcarbonos) e vapor d'água. Esses gases contribuem para uma maior absorção da radiação solar, resultando no aumento da temperatura na atmosfera. As causas do aquecimento recente, embora sem um consenso científico, se devem ao aumento nos níveis de gases de efeito estufa (GEE), em especial, o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera (ROSENDO; ROSA, 2012).

De acordo com Fitzsimmons et al. (2003), depois da queima de combustíveis fósseis, a mudança no uso da terra é a maior fonte de emissão de carbono antropogênico para a atmosfera.

O C atmosférico na forma de CO₂ é incorporado aos tecidos vegetais pelo processo de fotossíntese. Parte deste C nos tecidos vegetais pode ser usado pelas plantas como fonte de energia e o CO₂ retorna rapidamente à atmosfera. O material orgânico dos tecidos vegetais pode ser adicionado ao solo na forma de liteira ou servir de alimento para os animais, podendo então ser consumido durante a respiração, liberando CO₂ ou, posteriormente, ser depositado no solo como resíduos ou tecidos animais. Uma vez depositado no solo, o tecido animal ou vegetal é metabolizado por microrganismos e gradualmente o C retorna à atmosfera na forma de CO₂. O metabolismo microbiano no solo é responsável pela formação de compostos orgânicos de alta estabilidade, que permanecem no solo por longos períodos de tempo (BRADY; WEIL, 2002).

Em solos com cobertura vegetal natural, o estoque de C representa o balanço dinâmico entre a adição de material vegetal morto e a perda pela decomposição ou mineralização (D'ANDREA et al., 2004).

O solo é um importante compartimento de carbono (C) e exerce papel fundamental sobre a emissão de gases do efeito estufa (CARVALHO et al., 2010).

De todo o C orgânico no solo, uma parte considerável encontra-se sob a forma de matéria orgânica do solo. Entretanto, o material orgânico no solo é facilmente decomposto quando se realizam práticas de manejo não conservacionistas que promovem a liberação de GEE (CERRI et al., 2007). O aumento do estoque de matéria orgânica é um processo lento e necessita de manejo adequado, em especial em regiões de clima tropical, onde a taxa de decomposição é mais acentuada devido às altas temperaturas e umidade do solo (SIX et al., 2002).

As mudanças climáticas devido ao aumento da emissão de gases pelo homem modificam o regime hídrico e a temperatura global o que pode influenciar a produtividade das culturas (CARVALHO et al., 2010).

Diante da preocupação mundial em relação às mudanças do clima no planeta, decorrentes principalmente, das emissões de gases de efeito estufa, o estudo de estratégias que favorecem o sequestro de carbono no solo e na vegetação deve ser estimulado, no intuito de mitigar o impacto desse fenômeno climático.

O armazenamento de C no globo terrestre é dividido principalmente em cinco compartimentos: oceânico, geológico, pedológico, biótico (biomassa vegetal e animal) e atmosférico. Todos esses compartimentos são interconectados, e o C circula entre eles (LAL, 2004). O reservatório pedológico contém 2.500 Pg de C ($1 \text{ Pg} = 10^9 \text{ t}$), divididos em 1.550 Pg na forma de C orgânico e 950 Pg de C inorgânico (LAL, 2006).

Considerando-se os 30 cm superficiais de solo estima-se que a quantidade de C estocados está em torno de 800 Pg (CERRI et al., 2006), ou seja, quase a mesma quantidade armazenada no compartimento atmosférico (LAL, 2004).

No compartimento pedológico metade do C estocado, cerca de 787 Pg é referente aos solos sob florestas (DIXON et al., 1994). As áreas sob pastagens contêm cerca de 500 Pg (SCHARPENSEEL, 1997), e as sob cultivo agrícola, 170 Pg de C (PAUSTIAN et al., 2000).

Em regiões de clima tropical, as condições climáticas favorecem a decomposição da matéria orgânica do solo, armazenando menos C em relação a regiões de clima temperado. Apesar dessa maior taxa de decomposição de MOS, os solos em regiões de clima tropical estocam 32 % do total de C orgânico contido nos solos do planeta (CARVALHO et al., 2010).

A matéria orgânica do solo é toda fração orgânica localizada abaixo da superfície do solo, e consiste de matéria morta (98 % do total de C orgânico do solo) e viva (menos que 4 % do total de C orgânico do solo), provenientes de plantas, microrganismos, de meso e macrofauna, e de resíduos de animais e microrganismos do solo (ZATORRE, 2008). Este compartimento é importante no sequestro de C, pois é o maior reservatório de C terrestre (SWIFT, 2001). O processo de ciclagem de raízes e rizodeposição contribuem para a manutenção do C orgânico do solo (FARIA, 2006). No bioma Cerrado, a alta proporção de biomassa de raízes em relação à parte aérea contribui para a manutenção do C orgânico no solo (HARIDASAN, 2000).

O incremento de matéria orgânica do solo está associado a fatores de clima (temperatura e precipitação) (COSTA et al., 2008); textura e mineralogia do solo (OLIVEIRA et al., 2008). O aumento no teor de C pode ser potencializado em solos de textura fina e mal-drenados e em locais onde baixas temperaturas reduzem a decomposição da matéria orgânica (COSTA et al., 2008). Os estoques de C do solo estão diretamente relacionados à textura do solo. Os solos com maiores teores de argila, geralmente, possuem maiores estoques de C devido à proteção física que a fração argila exerce sobre a MOS (ROSCOE; MACHADO, 2002).

O material orgânico depositado sobre o solo, além de diminuir a amplitude térmica e conservar a água no solo, reduz a erosão hídrica (HERNANI et al., 2002), contribui com a diversidade dos organismos do solo (SILVA et al., 2008), os quais desempenham importantes atividades como a decomposição, a ciclagem de nutrientes, a síntese e a mineralização da matéria orgânica no solo (DECAËNS et al., 2003). Alterações na MOS influenciam diretamente a conservação do meio ambiente, pois afetam a infiltração, retenção de água, susceptibilidade à erosão, complexação de elementos tóxicos e estruturação do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005). Além de ser fonte de carbono, energia e nutrientes para os microrganismos heterotróficos, pela mineralização de nitrogênio (ZATORRE, 2008).

O carbono orgânico total ou a matéria orgânica são atributos do solo que acompanhados ao longo do tempo, são capazes de detectar as alterações na qualidade do solo em função do manejo (MIELNICZUCK, 2008). Portanto, os estoques de C e de N contidos nos solos podem ser submetidos a modificações, quando a vegetação nativa é retirada para a conversão da área em sistemas agrícolas e conforme o sistema de manejo do solo adotado, esses estoques podem permanecer estáveis, aumentar ou diminuir em relação ao sistema natural (FRAZÃO et al., 2010).

O estoque de carbono de um solo sob vegetação natural representa o balanço dinâmico entre a adição de material vegetal morto e a perda pela decomposição ou mineralização (MOREIRA; SIQUEIRA; 2006). A variação do estoque de C orgânico de um solo ao longo do tempo é dependente do tipo de uso e dos sistemas de manejo utilizados e seus efeitos sobre as adições e perdas de carbono, portanto, quando há igualdade entre as quantidades adicionadas e perdas de C orgânico no solo, não há variação no estoque de C (ADDISCOTT, 1995).

A emissão de CO₂ do solo para a atmosfera ocorre principalmente por dois processos biológicos: a decomposição de resíduos orgânicos e a respiração de organismos e sistema radicular das plantas, sendo a respiração radicular responsável por 20 % desse aumento na concentração de CO₂, e os 80 % restantes são devido à atividade microbiana presente no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A diminuição na quantidade de MOS tem contribuído com 78 Pg para a atmosfera na forma de CO₂, devido às mudanças no uso da terra e à agricultura. Por outro lado, solos submetidos a manejos conservacionistas podem acumular valores da ordem de 30 a 60 Pg de C em um período de 25 a 50 anos de cultivo recuperando quase todo o C perdido ao longo do tempo (LAL, 2004).

No Brasil, o estoque de C corresponde a cerca de 5 % do total de C estocado no mundo na camada de 0 a 30 cm de profundidade (BERNOUX et al., 2002).

Estudos indicam que a derrubada e queima da vegetação nativa, seguida de cultivo do solo no processo de conversão do Cerrado em agroecossistema, resulta em reduções dos estoques de C do solo e aumento da emissão de GEE para a atmosfera (SMITH et al., 2008). Neste bioma, o incremento ou a manutenção da MOS é dificultada devido às condições climáticas e às irregularidades na distribuição de precipitação pluvial (MACHADO; SILVA, 2001).

A manutenção da palha na superfície do solo, somada à ausência de revolvimento do solo, além de reduzir a emissão de CO₂ para a atmosfera, atua no aumento do estoque de C no solo (CARVALHO et al., 2010).

Em ecossistemas naturais, quando a vegetação nativa é substituída, os estoques de carbono orgânico podem ser reduzidos, com perdas de até 50 % nos primeiros 20 cm de profundidade do solo (FRANÇA, 2011). A magnitude e a taxa de diminuição de C do solo são aumentadas pela degradação e declínio da qualidade do solo (LAL, 2004).

A redução no estoque de C é promovida, principalmente, pelo preparo do solo, o qual promove a oxidação do C a CO₂ (BAYER; MIELNICZUK, 2008). Os sistemas de

produção que proporcionam baixo grau de mobilização do solo evitam as perdas de carbono. Além disso, o uso de sistemas de cultivo que mantenham a superfície do solo coberta (emprego de sistemas de rotação, consórcio ou sucessão de culturas) com espécies vegetais de alta produção de biomassa e que produzem resíduos de maior relação C:N favorecem o aumento do estoque de C no solo (SILVA et al., 2008).

Em virtude das quantidades de carbono que armazenam, os ecossistemas naturais são um dos condicionantes de processos que regulam a emissão do CO₂, tendo em vista que a variação no estoque de C regula os teores desse elemento para atmosfera (RANGEL; SILVA, 2007).

Resck et al. (2008b) estudaram o efeito de diferentes sistemas de manejo nos estoques de carbono de três classes de solos da Bacia Hidrográfica do Córrego Taquara, Distrito Federal, até a profundidade de 60 cm. Os resultados mostraram que os estoques de C diferenciaram-se quanto às classes de solos e aos usos. Foram encontrados os seguintes valores para as principais classes de solo sob uso antrópico no Domínio do Cerrado, Latossolo Vermelho (66,5 Mg C ha⁻¹), Latossolo Vermelho-Amarelo (53,09 Mg C ha⁻¹) e Neossolo Quartzarênico (38,14 Mg C ha⁻¹). Com relação aos sistemas de manejo, os resultados foram os seguintes: plantio convencional (62,9 Mg C ha⁻¹), plantio direto (67,9 Mg C ha⁻¹), pastagem (64,0 Mg C ha⁻¹) e Cerrado nativo (44,6 Mg C ha⁻¹).

Além do estoque de carbono ser influenciado por diferentes sistemas de manejo e classes de solo; resultados de pesquisa mostraram que os Campos Limpos Úmidos, sob Gleissolos e Plintossolos, possuem elevado potencial para estocar C no solo (FRANÇA, 2011).

A perda de C orgânico do solo pode ser atribuída à redução nas entradas de matéria orgânica, ao aumento da decomposição de resíduos culturais e a efeitos de manejo (POST; KWON, 2000). A taxa de ciclagem dos diferentes compostos de C orgânico no solo varia em função de complexas interações entre processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem no ambiente edáfico (POST; KWON, 2000).

Os teores de C tendem a diminuir com o cultivo do solo quando comparado à vegetação nativa fase floresta subcaducifólia, com precipitação média anual de 1.300 milímetros (ASSIS et al., 2006). Além disso, os teores de C superficiais tendem a diminuir, havendo pouca alteração em profundidades maiores (FRANÇA, 2011).

As camadas superficiais do solo são mais sensíveis às variações do estoque de C, devido à ação dos microrganismos na matéria orgânica do solo. Nas camadas mais

profundas o estoque de C contribui de forma mais estável para o acúmulo deste elemento no solo, o que pode ser explicado pelo menor efeito dos fatores climáticos, pela menor perturbação do solo, e por fatores inerentes aos resíduos (OLIVEIRA et al., 2008).

Do mesmo modo que o carbono, o nitrogênio (N) é um elemento relevante nos estudos de matéria orgânica do solo, pois é um elemento dinâmico e apresenta-se em maior parte na fração orgânica, sendo um grande reservatório de formas minerais prontamente disponíveis como a nítrica e a amoniacal (D'ANDREA et al., 2004). As regiões tropicais são importante fonte de N, pois aproximadamente 32 % do N total armazenado nos solos encontra-se nestas regiões (SIGNOR, 2010).

O nitrogênio é um importante nutriente para as plantas e, assim como o C e outros nutrientes, está incorporado às moléculas orgânicas do tecido vegetal (SIGNOR, 2010).

As considerações sobre o carbono em relação à decomposição e à formação de complexos mais estáveis no solo também são válidas para o N. Além disso, as taxas de decomposição dos resíduos no solo são governadas pela proporção entre C e N nos tecidos (relação C:N). A mineralização da matéria orgânica transforma, em média, de 2 % a 5 % do N orgânico por ano, processo que pode ser influenciado pelo uso e manejo do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

O nitrogênio total é determinado pela relação entre a taxa de adição e perda de N do solo (SIGNOR, 2010). Entretanto, para um acúmulo de N no solo, ou sequestro de N-N₂O, práticas de manejo como a redução da adubação nitrogenada e o uso de leguminosas ou gramíneas em consórcio são importantes para aumentar o teor de matéria orgânica no solo e reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa (SIGNOR, 2010).

Os teores de N, em diferentes profundidades do solo, apresentam o mesmo padrão de distribuição dos teores de C, com os maiores valores nas camadas superficiais, onde há o maior acúmulo de matéria orgânica (RANGEL et al., 2008). A relevância da inclusão do nitrogênio em estudos envolvendo a dinâmica da matéria orgânica se deve ao fato de que os compostos orgânicos representam um importante reservatório de formas de N potencialmente disponíveis para as culturas (D'ANDREA et al., 2004). O estoque de C e N em solos nativos de Cerrado diminui com o revolvimento para a introdução de cultivos (NEVES, et al., 2004). Além disso,

condições climáticas e a vegetação controlam os estoques de C e N (RANGEL; SILVA, 2007).

2.3.1.3. Físicos

As propriedades físicas do solo estão relacionadas a processos e funções tais como: suporte ao crescimento radicular; armazenamento e suprimento de água e nutrientes, trocas gasosas e atividade biológica. A densidade do solo está entre os indicadores físicos recomendados para aferir impactos no solo (LAL, 2004).

A. Densidade do solo (Ds)

O solo, por ser meio heterogêneo, apresenta propriedades e comportamento diversos, podendo manifestar interações complexas entre seus constituintes como resposta às diferentes técnicas de manejo e ou variações ambientais. Os atributos físicos do solo são importantes para o desenvolvimento das plantas, pois os seus constituintes sólidos interagem no sistema solo-planta (MELLONI et al., 2008).

Os Gleissolos se caracterizam por apresentarem naturalmente: baixa profundidade efetiva, densidade alta, baixa porosidade, elevada relação micro/macroporos, baixa velocidade de infiltração, drenagem deficiente e baixa capacidade de aeração (PAULETTO et al., 2005).

Normalmente, a densidade do solo tende a aumentar com a profundidade, sendo influenciada por diversos fatores, como o teor reduzido de matéria orgânica, menor agregação, maior compactação, diminuição da porosidade do solo, entre outros (ARAÚJO et al., 2007).

O aumento da densidade do solo em profundidade, provavelmente se relaciona a características intrínsecas do próprio solo (PAULETTO et al. 2005). A maior densidade do solo encontrada em profundidade, também pode ser explicada pelas pressões exercidas das camadas superiores sobre as subjacentes, que provocam a compactação, reduzindo a sua porosidade, bem como a movimentação de material de menor granulometria dos horizontes superiores para os inferiores (iluviação) que também concorre para a redução do espaço poroso e aumento da densidade (PAULETTO et al., 2005).

No geral, as camadas mais profundas são menos sujeitas a mudanças pelo uso do solo; Santos (2007) constatou pequena diferença entre Gleissolo e Cambissolo sugerindo que o Gleissolo tende a ser mais suscetível à compactação do que o Cambissolo devido à presença constante de água no perfil do solo. A condição de saturação de solo com água leva a maior probabilidade de compactação que a condição de solo mais aerado (MADARI, 2004).

O solo em áreas sob vegetação nativa sem histórico de interferência humana apresenta atributos físicos como a densidade, a porosidade, a agregação e a permeabilidade consideradas mais estáveis (ANDREOLA et al., 2000). Quando o solo é submetido ao processo produtivo, as propriedades físicas sofrem alterações (NEVES et al., 2007), perdem a qualidade estrutural o que leva a maior suscetibilidade à erosão (BERTOL et al., 2001). A partir do momento em que os solos são utilizados na produção agrícola, o uso intensivo e as práticas de manejo do solo inadequadas, alteram suas propriedades originais, levando ao aumento da compactação do solo, a uma maior resistência à penetração, além de reduzir a porosidade (MARTINS et al., 2010). Os atributos físicos, químicos e biológicos do solo podem sofrer modificações em algum grau, devido à compactação do solo (MARTINS et al., 2010).

A compactação é um processo que altera a estrutura pela quebra dos agregados, ocorrendo um rearranjo das partículas, modificando a configuração do espaço poroso do solo (HAKANSSON, 2005). As mudanças de volume são acompanhadas por alterações nas propriedades estruturais, na condutividade térmica e hidráulica e em características de transferências gasosas, afetando o balanço químico e biológico do solo (SILVA, 2011).

As consequências da compactação nas propriedades físicas do solo são o aumento da densidade do solo e da resistência à penetração, a diminuição da porosidade total e macroporosidade, redução da aeração e infiltração de água no solo. Os macroporos são os responsáveis pela condução de oxigênio e água através do perfil, e a perda destes poros leva à diminuição das trocas gasosas (GENRO JUNIOR et al., 2009). Os microporos são os responsáveis pela retenção de água no solo, e com a redução do tamanho dos poros a água estará mais fortemente retida, dificultando a sua absorção pelas plantas (BATEY, 2009).

A ocorrência de camadas compactadas no solo diminui a aeração e quando esse processo ocorre devido ao excesso de umidade no solo, a porosidade de aeração pode atingir valores menores do que 10 %, o que prejudica a difusão de gases e limita o

desenvolvimento do sistema radicular das plantas e o rendimento das culturas (SILVA, 2011).

A densidade é uma propriedade física que reflete o arrançamento das partículas do solo, que por sua vez definem as características do sistema poroso, sendo um importante indicativo das condições de manejo e, conseqüentemente, da porosidade, da permeabilidade e capacidade de armazenamento de água pelo solo (MELLONI et al., 2008).

Dentre os atributos físicos podem ser destacadas densidade do solo, densidade de partícula, porosidade total, argila dispersa em água, condutividade hidráulica, distribuição e estabilidade de agregados (JURY; HORTON, 2004). Alterações nesses atributos podem afetar a qualidade do solo uma vez que influencia na atividade biológica, disponibilidade de nutrientes e decomposição da matéria orgânica do solo (DEXTER, 2004).

Além de ser um indicador da qualidade, a densidade apresenta estreita correlação com a umidade do solo e é utilizada para determinar a quantidade de água e de nutrientes que existe no perfil do solo com base no volume (MELLONI et al., 2008).

A densidade do solo (D_s) é uma propriedade física comumente utilizada para caracterizar o seu estado de compactação (REICHERT et al., 2007). Devido à forma, ao tamanho e ao arrançamento diferenciado das partículas de areia e argila, os valores médios de densidade de solos arenosos ($1,20$ a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$) são maiores do que os solos argilosos ($1,00$ a $1,20 \text{ g cm}^{-3}$) (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Entretanto, esses autores recomendam cautela ao se considerar o valor absoluto da densidade do solo como referência para concluir se um solo está ou não compactado. Os valores de densidade de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para solos franco-argilosos a argilosos; e de $1,85 \text{ g cm}^{-3}$ para solos argilosos são crítico, pois comprometem o desenvolvimento das raízes (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Em áreas de floresta natural as camadas superficiais apresentam densidades próximas de $1,0 \text{ g cm}^{-3}$, entretanto há relatos de valores acima de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ (REICHERT et al., 2007).

Segundo Carvalho et al. (2004) não existe um consenso entre pesquisadores sobre um valor específico que evidencia o nível crítico para a densidade do solo, valor acima do qual o solo é considerado compactado. Goedert (2005) indica que valores entre $0,7 \text{ kg dm}^{-3}$ a $1,0 \text{ kg dm}^{-3}$ podem ser considerados normais em Latossolo Vermelho, e sugere $1,0 \text{ kg dm}^{-3}$ como limite permitido quando se deseja a sustentabilidade dos Latossolos.

A compactação é caracterizada pela redução de volume de solo, e sendo a densidade do solo uma propriedade expressa pela relação entre a massa seca do solo por unidade de volume, ela constitui um parâmetro prático para detectar a ocorrência do processo de compactação. Entretanto, a densidade sofre influência da textura (SILVA, 2011) e de processos pedogenéticos (MARTINS et al., 2010), e portanto, um valor de densidade que indique a existência de compactação em um solo pode variar para diferentes classes (SILVA, 2011).

A formação de camadas compactadas reduz a atividade biológica e a macroporosidade no perfil do solo, aumentando a densidade, o que proporciona maior resistência física à expansão radicular (JIMENEZ et al., 2008). Além disso, limita a permeabilidade e a disponibilidade de nutrientes e água (FREDDI et al., 2007). O impacto dos sistemas de preparo e manejo dos solos tem sido avaliados por meio de medidas de propriedades físicas, como a densidade e a porosidade do solo (CARNEIRO et al., 2009), pela resistência do solo à penetração (TAVARES FILHO; RIBON, 2008) e pela distribuição dos agregados em classes de tamanho ou por sua estabilidade em água (CASTRO FILHO et al., 1998).

É comum relacionar o crescimento radicular em solos compactados com sua densidade. Para cada solo há uma densidade crítica, a partir da qual a resistência torna-se tão elevada que diminui ou impede o crescimento de raízes (MARTINS et al., 2010). A habilidade das raízes penetrarem no perfil diminui quando a densidade e a resistência do solo aumentam. Em solos com menor umidade, a coesão e a resistência do solo à penetração aumentam e a pressão hidrostática das células das raízes diminui, com consequente redução da força na coifa e na região meristemática para superar a resistência do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISCOTT, T. M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, v. 46, n. 2, p. 161-168, 1995.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Ed.) **Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry**. London: Academic Press. 576p. 1995.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.25, p.393-395, 1993.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. **Soil Biology and Biochemistry**, v.22, p.251-255, 1990.

ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p. 857-865, 2000.

ARAÚJO, E. A de. **Qualidade do solo em ecossistema de mata nativa e pastagens na região leste do Acre, Amazônia Ocidental**. UFV. Tese de doutorado. 233p. Viçosa, 2008.

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, v.31, p.1099-1108, 2007.

ARSHAD, M. A.; MARTINS, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.88, n.2, p.153-160, 2002.

ASSIS, C. P.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono e nitrogênio em agregados de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1541-1550, 2006.

AQUINO, A. M.; SILVA, E. M. R.; SAGGIN JUNIOR, O.; RUMJANEK, N.; DE-POLLI, H.; REIS, V. M. A biota do solo e processos relevantes num novo contexto da agricultura. In: **Recomendações para adubação e manejo da fertilidade do solo no Estado do Acre**. Rio Branco, cap. 04, 2005.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. 2ª ed. Bookman, Porto Alegre, 2005.

BALESDENT, J; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, v.53, p.215-230, 2000.

BARDGETT, R. D.; SAGGAR, S. Effect of heavy metal contamination on the short-term decomposition of labeled (^{14}C) in a pasture soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.26, p.727-733, 1994.

BARETTA, D.; SANTOS, J. C. P.; FIGUEIREDO, S. R.; KLAUBERG-FILHO, O. Efeito do monocultivo de *pinus* e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no planalto sul catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.5, p.715-724, 2005.

BATEY, T. Soil compaction and soil management: a review. **Soil Use and Management**, Oxford, v.25, p.335-345, 2009.

BATISTA, A. C. Biodiesel no tanque, http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=/energia/index.html&conteudo=/energia/artigos/oleo_vegetal.html. (Acesso em 12/08/09).

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fundamentos da material orgânica do solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Ecosistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed., Porto Alegre: Metrópole, 2008. 645p.

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 888-896, 2002.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Science Agriculture**, v.58, p.555-560, 2001.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 13th. Ed. Prentice Hall: Upper Saddle River, 960 p., 2002.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**, Piracicaba: DEGASPAR, 132p., 1997.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.147-157, 2009.

CARVALHO, F. de **Atributos bioquímicos como indicadores da qualidade de solo em florestas de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. no Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado – ESALQ, Piracicaba, 2005.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1153-1155, 2004.

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

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p. 527-538, 1998.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, v. 64, p. 83-99, 2007.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P.; LAL, R. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, C. E. P. **Carbon sequestration in soils of Latin America**. Haworth Press, p. 41-47, 2006.

CHOROMANSKA, U.; DELUCA, T. H. Prescribed fire alters the impact of wildfire on soil biochemical properties in a ponderosa pine Forest. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.65, p.232-238, 2001.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICKZUK, J. & SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.29, p.777-788, 2005.

COSTA, J. B. **Caracterização e constituição do solo**. 7ª ed. Lisboa, Ed. Fundação Calouste, 2004.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 323-332, 2008.

D'ANDREA, 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, p.179-186, 2004.

DECAËNS, T.; LAVELLE, P.; JIMÉNEZ, J. J.; ESCOBAR, G.; RIPPSTEIN, G.; SCHNEIDMADL, J.; SANZ, J. I.; HOYOS, P.; THOMAS, R. J. Impacto del uso de la tierra em la macrofauna del suelo de los Llanos Orientales de Colombia. In: JIMÉNEZ, J. J.; THOMAS, R. J. (Ed.). **El arado natural**: las comunidades de macroinvertebrados del suelo em las sabanas neo tropicales de Colombia. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, p. 21-45, 2003.

DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M. **Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo: método fumigação-extração**. Seropédica: Embrapa – CBPAB, 10p. (Embrapa – CNPAB. Documentos, 37). 1997.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120, p.201-214, 2004.

DIAS, H. C. T.; SATO A. Y., OLIVEIRA NETO, S. N. de, MORAIS, T. de C., FREIRE A. e BENTO, P. S. **Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de**

pastagens. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, MG: EPAMIG, v.32, n.265, p. 52-60, nov. / dez. 2011.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, v. 263, p. 185-190, 1994.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWARD, B. A. (eds.). **Defining soil quality for sustainable environment**. Madison: SSSA p.3-21. (SSSA. Special Publication, 35), 1994.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil Health and sustainability; managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v.15, p.3-11, 2000.

EMBRAPA CERRADOS: **Conhecimento, tecnologia e compromisso ambiental / Embrapa Cerrados**. –2.ed. rev. e ampl. – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005.

ESWARAN, H. ; LAL, R & REICH, P.F. Land degradation: An overview. In: BRIDGES, R. F., ED. Response to land degradation. Response to Land Degradation. Madison, IBSRAM. **Science Publishers**, . p.20-35, 2001.

FALEIRO, F. G.; GAMA, L. C.; FARIAS NETO, A. L.; SOUSA, E. S. O Simpósio Nacional sobre o Cerrado e o Simpósio Internacional sobre Savanas Tropicais, In: FALEIRO, F. G. & FARIAS NETO, A. L. (Ed.). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Cap. 1, p.33-48, 2008.

FALL, D.; DIOUF, D.; ZOUBEIROU, A. M.; BAKHOUM, N.; FAYE, A.; SALL, S. N. Effect of distance and depth on microbial biomass and mineral nitrogen content under *Acacia Senegal* (L.) Willd. Trees. **Journal of Environmental Management**, v. 95, p.S260-S264, 2012.

FARIA, G. E. **Características químicas e frações da matéria orgânica do solo em diferentes distâncias do tronco e de raízes de eucalipto**. 2006. 106p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

FIALHO, J. S.; GOMES, V. F. F.; OLIVEIRA, T. S.; SILVA JUNIOR, J. M. T. Indicadores da qualidade do solo em áreas sob vegetação natural e cultivo de bananeiras na Chapada do Apodi-CE. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.37, p.250-257, 2006.

FITZSIMMONS, M. J.; PENNOCK, D. J.; THORPE, J. Effects of deforestations on ecosystem carbon densities in central Saskatchewan, Canadá. **Forest Ecology and Management**, v. 188, p. 349-361, 2003.

FRANÇA, A. M. da S. **Função de pedotransferência para estimativa de estoques de carbono em solo de áreas de campo limpo úmido do Distrito Federal**. 2011. 144 fls. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

FRANCHINI, J. C.; CRISPINO, C. C.; SOUZA, R. A.; TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.92, n.1, p.18-29, 2007.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, 66, p.95-106, 2002.

FRAZÃO, L. A.; SANTANA, I. K. S.; CAMPOS, D. V. B.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.1198-1204, 2010.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.627-636, 2007.

GAMA-RODRIGUES, S. F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS G. A.; CAMARGO, F. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v.153, n.3/4, p.347-352, 2009.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, p.65-73, 2009.

GIESTEIRA, M. Seminário debate uso sustentável do solo. Publicado em 11 de abril de 2011. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2011/04/seminario-debate-uso-sustentavel-do-solo>>. Acesso em 18 setembro, 2012.

GOEDERT, W. J.; WAGNER, E.; BARCELLOS, A. O. Savanas Tropicais: dimensão, histórico e perspectivas. In: FALEIRO, F. G. & FARIAS NETO, A. L. (Ed.). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos Naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Cap. 2, p. 49-80, 2008.

GOEDERT, W. J. Qualidade do solo em sistemas de produção agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30, 2005, Recife. **Anais ...** Recife: SBCS, 1 CD-ROM, 2005.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescentes sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.909-920, 2012.

HAKANSSON, I. **Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures**. Uppsala: Dept. of Soil Sciences, Division of soil management, 153p., 2005.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of nature, causes and possible solutions. **Soil Tillage and Research**, v.82, p.121-145, 2005.

HARIDASAN, M. Nutrição mineral de plantas nativas do Cerrado. **Revista Brasileira e Fisiologia Vegetal**, v. 12, n. 1, p. 54-64, 2000.

HERNANI, L. C.; FREITAS, P. L.; PRUSKI, F. F.; de MARIA, I. C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J. N. A erosão e seu impacto. In: MANZATO, C. V.; JUNIOR, E. F.; PERES, J. R. R. (eds.) **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, cap.5, p. 47-60, 2002.

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

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate change 2007. Fourth Assessment Report on climate change impacts, adaptation and vulnerability of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University, 939p., 2007.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.55, p.69-78, 2000.

JANZEN, H. H.; CAMPBELL, C. A.; IZAURRALDE, R. C.; ELLERT, B. H.; JUMA, N.; MCGILL, W. B.; ZENTNER, R. P. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. **Soil Till**, v. 47, p.181-195, 1998.

JENKINSON, D.S.; LADD, J.N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. **Soil Biology and Biochemistry**. Oxford, v.5, p.415-471, 1981.

JIMENEZ, R. L.; GONÇALVES, W. G.; ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R.; SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.2, p.116-121, 2008.

JURY, W. A.; HORTON, R. **Soil Physics**. New York: John Wiley & Sons, 370p, 2004.

KELTING, D. L.; BURGER, J. A.; PATTERSON, S. C.; AUST, W. M. MIWA, M.; TRETTIN, S. C. Soil quality indicators to assess sustainable forest management – a southern pine example. **Forest Ecology and Management**, Berlin, v.122, p.167-185, 1999.

KLINK, C.; MACHADO, R. B. **A conservação do Cerrado brasileiro**. Belo Horizonte, Megadiversidade, v. 1, n.1, p.148-155, 2005.

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

LAL, R. **Soil carbon sequestration in Latin America**. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, C. E. P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth Press, p.49-64, 2006.

LIMA, M. R (Org.). **Manual de diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos agrícolas**. 2.ed. Curitiba: UFPR, p. 97-98, 2003.

LISBOA, B. B. **Parâmetros microbiológicos como indicadores de qualidade do solo em sistemas de manejo**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 77 p., 2009.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility estaus of surface soil under “Cerrado” vegetation in Brasil. **Soil Science Society of American Journal, Madison**, v.41, n.4, p.742-746, 1977.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa, SP: Plantarum, 352p., 1992.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; ALOVISI, A. M. T.; GOMES, S. F.; GASPARINE, A. S.; NUNES, C. M. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia**, v.41, n.1, p.20-28, 2011.

LUCHESE, E. B. ; FAVERO, L. O. B. ; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo teoria e prática**. 2ª ed. Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 2002.

MACHADO, P.O.L.A; SILVA, C.A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, p. 119-130, 2001.

MACHADO, P. L. O. O carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, p. 329-334, 2005.

MADARI, B. E. Fracionamento de agregados: Procedimento para uma estimativa compartimentada do sequestro de carbono no solo. EMBRAPA. **Comunicado Técnico**, n.22, Rio de Janeiro, 2004.

MADER, P.; FLIEBACH, A; DUBOIS, D.; GUNST, L.; FRIED, P.; NIGGLI, U. Soil fertility and biodiversity in organic farming. **Science**, v.296, p.4, 2002.

MALUCHE, C. R. D. **Atributos microbiológicos e químicos do solo em sistema de produção de maçã convencional e orgânico**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, Santa Catarina. 72 p., 2004.

MALUCHE-BARETTA, C. R. D.; AMARANTE, C. V. T.; KLAUBERG-FILHO, O. Análise multivariada de atributos do solo em sistemas convencional e orgânico de produção de maçãs. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.10, p.1531-1539, 2006.

- MARISOLA FILHO, L. A. Cultivo e processamento de coco macaúba para a produção de biodiesel. Viçosa – MG, **Centro de Produções Técnicas – CPT**, 333p., 2009.
- MARTINS, C. A. da S.; PANDOLFI, F.; PASSOS, R. R.; REIS, E. F. dos; CABRAL, M. B. G. Avaliação da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes coberturas vegetais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.26, n.1, p.79-83, 2010.
- MATSUOKA, M.; MENDES, I. de C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.3, p.425-433, 2003.
- 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**, Viçosa, v.32, p.2461-2470, 2008.
- MIELNICZUCK, J. Matéria Orgânica e a Sustentabilidade de Sistemas Agrícolas. In: SANTOS, G. de A; SILVA, L. S.; CANNELAS, L. P.; CAMARGO, F. O. Fundamentos da matéria orgânica do solo. **Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. 2ª Ed. Metrópole, Porto Alegre, p. 1-5, 2008.
- MIRAGAYA, J. C. G. Biodiesel: tendências no mundo e no Brasil. **Informe Agropecuário**, v.26, p.7-13, 2005.
- MOREIRA, F. M. de S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 729p., 2006.
- MOTA, C. S.; CORRÊA, T. R.; GROSSI, J. A. S.; RIBEIRO, A. da S. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, Vol. 32 No. 265 p. 41-51, 2011.
- MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; GOMES J. B. V. Occurrence of macaúba in Minas Gerais, Brazil: relationship with climatic, pedological and vegetation attributes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.7, p.1023-1031, 2002.
- MOURA, E. F. **Embriogênese somática em macaúba: indução, regeneração e caracterização anatômica**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa – MG, 66p. 2007.
- NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; CARDOSO, E. L.; MACEDO, R. L. G.; FERREIRA, M. M.; SOUZA, F. S. Atributos indicadores da qualidade do solo em Sistemas Agrossilvipastoril no Noroeste do Estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.74, p.45-53, 2007.
- NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MACEDO, R. L. G.; TOKURA, A. M. Estoque de carbono em sistemas agrossilvipastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região noroeste do estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 5, p. 1038-1046, 2004.

- ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 434p. 1983.
- OLIVEIRA, J. T.; MOREAU, A. M. S. S.; PAIVA, A. Q.; MENEZES, A. A.; COSTA, O. V. Características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2821-2829, 2008.
- PALMIERI, F.; LARACH, J. O. I. Pedologia e geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (Orgs.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**, 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.59-122. 2004.
- PAULETTO, E. A.; BORGES, J. R.; SOUSA, R. O. de; PINTO, L. F. S.; SILVA, J. B. da; LEITZKE, V. W. Avaliação da densidade e da porosidade de um Gleissolo submetido a diferentes sistemas de cultivo e diferentes culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.11, n.2, p.207-210, 2005.
- PAUSTIAN, K.; SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; HUNT, H. W. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 147-163, 2000.
- 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**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 567-573, 2004.
- POST, W. M.; KWON, K. C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. **Global Change Biology**, Oxford, v. 6, n. 3, p. 317-327, 2000.
- POWLSON, D. S.; BROOKES, P. C.; CHRISTENSEN, B. T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology and Biochemistry**. v.19, p.159-164, 1987.
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; MELO, L. C. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. C de. Carbono orgânico e nitrogênio total do solo e suas relações com os espaçamentos de plantio de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2051-2059, 2008.
- 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 Ciência Solo**, v.31, p.1609-1623, 2007.
- RATTER, J. A. BRIDGEWATER, S.; ATKINSON, R.; RIBEIRO, J. F. Analysis of the floristic composition of the Brazilian cerrado vegetation. **Edinburgh Journal of Botany**, v.53, n.2, p.153-180, 1996.
- REATTO, A.; MARTINS, E. S.; SPERA, S. T.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V.; CARVALHO Jr., O. A.; GUIMARÃES, R. F. Levantamento detalhado dos solos da bacia hidrográfica do Córrego Taguatinga, DF, escala 1:25.000. Planaltina: Embrapa Embrapa Cerrados. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 122, 2004.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Comparação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação.

In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. da; REICHERT, J. M. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.5, p.49-134, 2007.

REIS, A. R.; FURLANI JÚNIOR, E.; BUZZETI, S.; ANDREOTTI, M. Diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila. **Bragantia**, 65: 163-171, 2006.

RESCK, D. V. S.; FERRERIA, E. A. B.; FIGUEIREDO, C. C.; ZINN, Y. L. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 Ed. Porto Alegre: Metrópole, p.359-417, 2008a.

RESCK, B. S.; RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; GOMES, A. C. Estoque de carbono do solo sob diferentes sistemas de manejo na Bacia Hidrográfica do Córrego Taquara, Distrito Federal. In: Simpósio Nacional do Cerrado, 2008, Brasília. **Anais**. Brasília, Embrapa-CPAC, 2008b.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (Ed.). **Cerrado: Ambiente e Flora**. Planaltina: Embrapa-CPAC, cap. 3, p. 89-166, 1998.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica. Dourados: **Embrapa Agropecuária Oeste**. 86p. 2002.

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

SANTOS, B. R.; PAIVA, R.; DOMBROSKI, J. L. D.; MARTINOTTO, C.; NOGUEIRA, R. C.; SILVA, A. A. N. Pequizeiro (*Caryocar brasiliense* Camb.): uma espécie promissora do cerrado brasileiro. **Boletim Agropecuário da Universidade Federal de Lavras**, 64, 29p., 2004.

SANTOS, E. dos. **Carbono, nitrogênio e relação C/N em Gleissolo e Cambissolo sob diferentes tipologias vegetais na área de ocorrência da floresta ombrófila densa, Antonina – PR**. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SCARIOT, A.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Flowering and fruiting phenologies of the palm *Acrocomia aculeata* patterns and consequences. **Biotrópica**, Washington, v.27, n.2, p. 168-173, 1995.

SCHARPENSEEL, H. W. Preface to workshop ‘Management of carbon in tropical soils under global change: Science, practice and policy’. **Geoderma**, v. 79, p. 1-8, 1997.

SCHLOTTER, M.; DILLY, O.; MUNCH, J. C. Indicators for evaluating soil quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.98, n.1/3, p.255-262, 2003.

SIGNOR, D. **Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases do efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba**. Dissertação (Mestrado) – Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 119 p., 2010.

SILVA, R. R. da. **Qualidade do solo em função de diferentes sistemas de manejo na região de campos vertentes, bacia Alto do Rio Grande – MG**. Dissertação de Mestrado, UFLA. 96p. Lavras, 2001.

SILVA, S. G. C. **Variação temporal da densidade do solo e do grau de compactação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado**. Dissertação de mestrado, Piracicaba, 65p., 2011.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; CORAZZA, E. J.; VIVALDI, L. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the Cerrado region, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 103, n.2, p. 357-363, 2004

SILVA, R. F. da; AQUINO, A. M. de; MERCANTE, F. M.; GUIMARÃES, M. de F. Macrofauna invertebrada do solo em sistema integrado de produção agropecuária no Cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, p. 725-731, 2008

SIQUEIRA. J. O.; MOREIRA, F. M. de S.; GRISI, B. M.; ARAÚJO, R. S. **Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Brasília, DF: EMBRAPA - SPI, 142p.; 1994.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; MORAES, J. C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Agronomie**, v. 22, p. 755-775, 2002.

SMITH, P.; JANZEN, H.; MARTINO, D.; ZUCONG, Z.; KUMAR, P.; MCCARL, B.A.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHOLLES, B.; SIROTKENKO, O.; HOWDEN, M.; MCALLISTER, T.; GENXING, P.; ROMANEKOV, V.; SCHNEIDER, U.A.; TOWPRAYOON, S.; WATTENBACH, M.; SMITH, J. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 363, p. 789-813, 2008.

SPOSITO, G.; ZABEL, A. The assessment of soil quality. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, n.3/4, p.143-144, 2003.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2 ed. New York: Wiley, 1994.

SWIFT, R. S. Sequestration of carbon by soil. **Soil Science**, v. 166, p. 858-871, 2001.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em relação ao número de amostras e ao tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.487-494, 2008.

TEIXEIRA, L. C. Potencialidades de oleaginosas para produção de biodiesel. **Informe Agropecuário**, v.26, p.18-27, 2005.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S. S. & ALVAREZ, V. H. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG. SBCS, v.2, p.195-276, 2002.

USSIRI, D. A. N.; JOHNSON, C. E. Characterization of organic matter in a Northern hardwood forest soil by ¹³C NMR spectroscopy and chemical methods. **Geoderma**, v.111, p.123-149, 2003.

WARDLE, D. A.; GHANI, A. A. A critique of the microbial metabolic quotient as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. **Soil Biology and Biochemistry**, v.27, n.12, p.1601-1610, 1995.

WARDLE, D. A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological Reviews**, v.67, p.321-358, 1992.

ZATORRE, N. P. Atributos biológicos do solo como indicadores de qualidade do solo. **Gaia Scientia**, v. 2, p.9-13, 2008.

3. CAPÍTULO 1: EFEITO DA VARIAÇÃO SAZONAL E ESPACIAL NOS ATRIBUTOS BIOLÓGICOS E QUÍMICOS DE UM GLEISSOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi estudar as alterações nos teores do carbono microbiano (Cmic); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO_2) e microbiano (qMic); matéria orgânica (MOS), nitrogênio total (NT) e relação C:N em função da variação sazonal e espacial, em um Gleissolo sob macaubeiras nativas, no Cerrado. O estudo observacional foi realizado na região de Planaltina de Goiás, na Fazenda Agropecuária Santa Fé. Foram selecionadas dez árvores em uma mata com macaubeiras nativas no bioma Cerrado. A coleta de solo foi realizada na camada de 0 a 10 centímetros de profundidade, sob uma linha horizontal, imaginária, traçada a partir da base do estipe das macaubeiras. As amostras de solo foram coletadas a 50, 150 e 250 centímetros de distância do estipe da palmeira, no período chuvoso (março de 2010) e seco (julho 2010). Para a avaliação estatística das variáveis observadas, utilizou-se um modelo misto. As médias das variáveis observadas foram submetidas a testes para verificar se seguiam a distribuição normal, e para verificar a homogeneidade de variâncias. Em seguida, os dados foram submetidos ao teste F e as médias foram comparadas pelo teste t. Os atributos Cmic, RB, qCO_2 e a MOS são sensíveis à variação sazonal e espacial em mata de macaubeiras no Cerrado. O NT apresenta variação espacial. A relação C:N sofre alteração em função da época de coleta. A microbiota presente no solo sob macauba foi mais eficiente e se manteve mais equilibrada durante o inverno seco, apresentando maiores teores de Cmic, menor qCO_2 , maior Cmic:Corg e menor C:N.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade do solo. *Acrocomia aculeata*. Indicadores microbiológicos. Matéria orgânica. Biodiesel.

EFFECT OF THE SPATIAL AND SEASONAL VARIATIONS BY THE BIOLOGICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES IN GLEYSOL UNDER NATIVE MACAUBA PALMS

ABSTRACT: The aim of this study was to investigate the changes in soil microbial biomass carbon (Mic-C); basal respiration (RB); metabolic quotient (qCO_2); microbial quotient (qMic); organic matter (SOM); total nitrogen (TN); and in C:N ratio influenced by the spatial and seasonal variations of a Gleysol, under native macauba palms (*Acrocomia aculeata*). This observational study took place in Santa Fé Agropecuaria farm, in the region of Planaltina de Goias, State of Goias. Ten trees were selected from a native forest containing macauba palms. Soil samples were taken at a depth of 0 - 10 cm from a horizontal imaginary line, drawn from the macauba's palm trunk. Soil samples were taken from a 50, 150 and 250 cm distance from the trunk, during the wet summer (March, 2010) and the dry winter (July, 2010). The mixed model was used in order to evaluate the observational study. The observational means were submitted to testing to evaluate if their values followed a normal distribution and to test homogeneity of variance. Subsequently, data were submitted to the F-test and the means were compared using the t-test. The Mic-C, BR, qCO_2 and the SOM have been

found to be sensitive to seasonal and spatial variation in the native forest of macauba palms, in the Cerrado. The TN showed to be sensitive to spatial variation, whereas the C:N ratio was altered by the period of soil collection. The microbiota present in the soil under macauba palms was more efficient and maintained a higher equilibrium during the dry winter, presenting higher values of Mic-C and Mic-C:Corg, and lower values of qCO₂ and C:N ratio.

KEY-WORDS: Soil quality. *Acrocomia aculeata*. Microbiological indicators. Organic matter. Biodiesel.

3.1. INTRODUÇÃO

Para a produção de biocombustíveis, diversas espécies são utilizadas, com composição e rendimento energéticos variados. As palmeiras são consideradas matérias-primas alternativas para a produção de óleo vegetal em substituição à soja e dentre elas, cita-se a macaúba (*Acrocomia aculeata*), espécie nativa de ocorrência típica no Cerrado brasileiro. A macaúba apresenta ampla utilidade, e dentre elas são relatados usos medicinais, alimentícios, cosméticos. Além disso, características como a adaptabilidade a regiões com restrições hídricas em certas épocas do ano e a rusticidade possibilitam o uso desta palmeira em programas de recuperação de áreas degradadas. Estudos demonstram que em um hectare de macaúba é possível produzir até 4.000 L de óleo vegetal, 1.200 kg de carvão vegetal, e 5.300 kg de farelo para rações (MARISOLA FILHO, 2009; DIAS et al., 2011).

Nesse contexto, para que seja viabilizada a expansão dos cultivos de macaubeiras, faz-se necessário o estudo do ambiente de ocorrência dessa espécie, uma vez que as interações solo-planta-atmosfera determinam funções fundamentais nos ecossistemas terrestres. O entendimento de tais funções é importante para direcionar as atividades antrópicas com o foco na sustentabilidade da cadeia de produtos e co-produtos oriundos da macaúba (MARISOLA FILHO, 2009). Além disso, nas bases de dados científicas são escassos os trabalhos que envolvem os atributos do solo, manejo e os prováveis impactos do cultivo comercial de macaubeiras. Diante do potencial de exploração econômica desta espécie nas áreas do Cerrado, é necessária a avaliação da qualidade do solo sob esse sistema, para monitorar e controlar possíveis impactos que levem, ou contribuam para aumentar, a degradação do solo.

Em seu estado natural, o solo encontra-se coberto pela vegetação, que o protege da erosão e contribui para manter o equilíbrio entre os fatores de sua formação e aqueles que promovem sua degradação. O rompimento dessa relação provoca alterações

biológicas, químicas e físicas nas funções do solo e em sua capacidade produtiva (SIQUEIRA et al., 1994).

Os atributos biológicos do solo são indicadores de processos que ocorrem no solo em resposta às perturbações antropogênicas, e constituem em variáveis para prever a qualidade dos ecossistemas agrícolas (PÔRTO et al., 2009).

A atividade microbiana reflete a influência conjunta de todos os fatores que regulam a degradação da matéria orgânica; formação e estabilização de agregados e ciclagem biogeoquímica de nutrientes no solo (TÓTOLA; CHAER, 2002). Além disso, a biomassa microbiana representa expressiva parcela de carbono, nitrogênio e fósforo do solo (NANNIPIERI et al., 2003). Portanto, os microrganismos e suas transformações bioquímicas são indicadores da qualidade do solo e respondem rapidamente a mudanças decorrentes de alterações no manejo. Entretanto, o estudo das variáveis biológicas devem ser combinados entre si, para produzir relações como os quocientes microbianos e metabólicos que também refletem perturbações dos ecossistemas (HARRIS, 2003).

Um manejo adequado dos solos, que contribua para aumentar ou conservar a sua qualidade, além de aumentar a produtividade do sistema de produção, contribuirá para manter a boa qualidade ambiental (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Devido à grande participação do carbono na constituição dos materiais orgânicos, os estudos sobre a dinâmica, caracterização e funções da MOS (matéria orgânica do solo) são realizados, principalmente, por meio do carbono orgânico total. As alterações na MOS influenciam as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, tais como a agregação (SALTON et al., 2008), armazenamento de água (RESCK et al., 2008), capacidade de troca catiônica (CTC) (REIN; DUXBURY, 2008), disponibilidade de nutrientes (ASHAGRIE et al., 2007) e são dependentes das condições do solo, clima e práticas culturais adotadas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

O objetivo deste trabalho foi estudar as alterações nos teores do carbono microbiano (C_{mic}); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO_2) e microbiano (q_{Mic}); matéria orgânica (MOS), nitrogênio total (NT) e relação C:N em função da variação sazonal e espacial, em um Gleissolo sob macaubeiras nativas, no Cerrado.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo e amostragem

O estudo observacional foi realizado na região de Planaltina de Goiás, na Fazenda Agropecuária Santa Fé (15°20'35'' S e 47°34'34'' W), e altitude de 1017

metros), Goiás, Brasil. É um maciço de macaubeiras nativas de ocorrência em formação savânica do bioma Cerrado, com vegetação do tipo palmeiral e subtipo macaубal, próxima à mata de galeria não inundável associada à pastagem. O clima predominante corresponde ao tropical estacional de savana do tipo Aw, conforme classificação de Köppen, com temperatura média anual entre 18 °C e 28,5 °C. A precipitação pluvial média anual é de aproximadamente 1.400 milímetros, concentrada entre os meses de outubro a março (Figura 1). A região apresenta duas estações bem definidas: estação seca e fria durante o inverno e estação chuvosa e quente durante o verão.

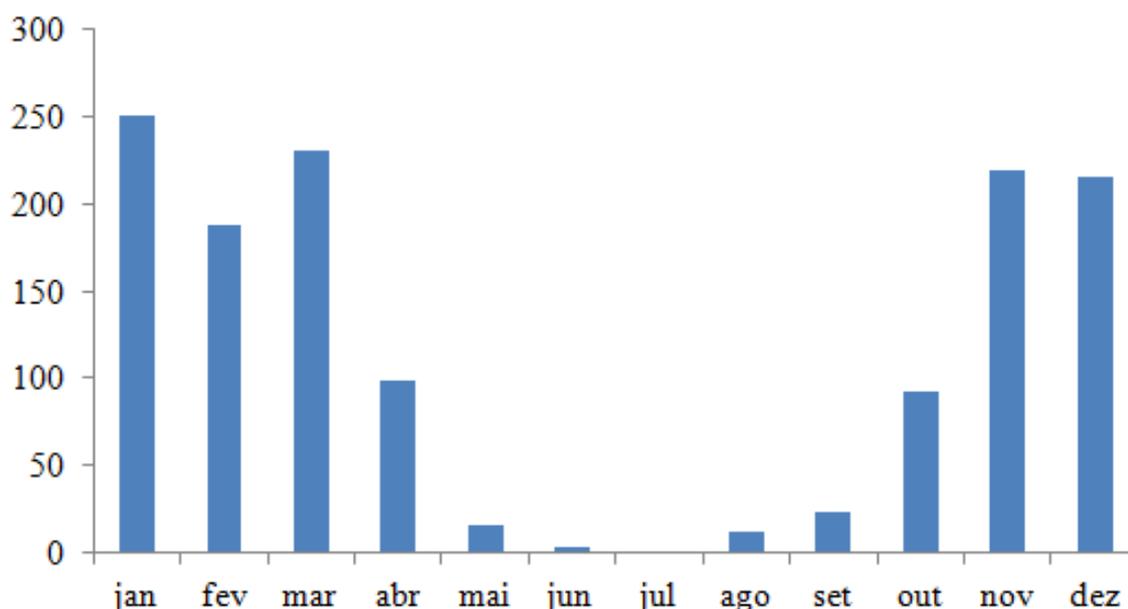


FIGURA 1 – Precipitação média mensal no período do estudo observacional (janeiro de 2010 a dezembro de 2010), no município de Planaltina de Goiás, Goiás. Fonte: ANA, 2013.

O estudo foi realizado em um Gleissolo, textura média, fase mata de galeria não inundável em relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2006). As propriedades físico-químicas do solo na camada 0 a 20 cm foram: argila (g kg^{-1}) = 327; silte (g kg^{-1}) = 250; areia (g kg^{-1}) = 423; pH (H_2O) = 4,8; M.O. (g kg^{-1}) = 32,3; P (mg dm^{-3}) = 6,7; K^+ (mg dm^{-3}) = 89; Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) = 2,8; Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) = 1,5; H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) = 6,1; Al^{3+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) = 0,3.

Na área com macaubeiras foram selecionadas, ao acaso dentro da mata, dez árvores, vigorosas com aproximadamente 10 metros de altura; isoladas em um raio de três metros da possível interferência de raízes de outras árvores e arbustos. As amostras de solo foram coletadas a 50, 150 e 250 centímetros de distância do estipe das palmeiras. Uma linha horizontal, imaginária, foi traçada a partir da base do estipe das

macaubeiras e sobre ela foram coletadas cinco subamostras à direita e cinco à esquerda, perpendicularmente a essa linha, totalizando dez subamostras para formar uma amostra composta, contendo aproximadamente 800 gramas de solo, para cada distância.

Foram coletadas amostras de 0 a 10 centímetros de profundidade, sendo 30 durante o verão (março de 2010) e 30 no inverno seco (julho 2010), totalizando 60 amostras de solo. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e transportadas em caixa de isopor com gelo até o Laboratório de Microbiologia e Bioquímica do Solo da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília (FAV/UnB-DF). Em seguida, uma porção de solo (aproximadamente 300 gramas) de cada amostra foi separada, acondicionada em saco plástico identificado e mantida sob refrigeração (± 4 °C) até o momento das análises biológicas. A outra fração (500 gramas) destinada às análises químicas foi seca ao ar e tamisada em peneira com malha de abertura de dois milímetros para formar a terra fina seca ao ar (TFSA) e armazenada em sacos plásticos à temperatura ambiente até o momento das análises químicas.

Métodos Analíticos

Determinação da biomassa microbiana do solo: A biomassa microbiana do solo (BMS) foi estimada pelo método clorofórmio-fumigação-extração (CFE), proposto por Vance et al. (1987). O carbono microbiano (C_{mic}) foi obtido pela diferença entre o carbono extraído das amostras fumigadas e não fumigadas multiplicada pelo fator de conversão ($K_{EC} = 0,38$), conforme Wardle (1994).

Avaliação da atividade microbiana do solo: A atividade microbiológica foi avaliada pela respiração basal (RB), pelo método de quantificação do dióxido de carbono ($C-CO_2$) desprendido das amostras de solo não fumigadas em um período de sete dias (ALEF; NANNIPIERI, 1995).

Cálculo do quociente metabólico (qCO_2): O quociente metabólico (qCO_2) é a taxa de respiração específica da biomassa microbiana e foi calculado pela divisão da respiração basal ($C-CO_2$) pelo carbono microbiano (C_{mic}); (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

A partir dos resultados do carbono microbiano (C_{mic}) e do carbono orgânico total (C_{org}), foi calculada a relação entre o carbono microbiano e orgânico ($C_{mic}:C_{org}$), definida como quociente microbiano (q_{Mic}), expressa como o percentual de carbono microbiano em relação ao carbono orgânico total do solo. Essa relação

fornece dados sobre a eficiência da conversão do carbono orgânico em carbono microbiano (SPARLING, 1992).

Determinação da matéria orgânica do solo (MOS): A matéria orgânica do solo foi determinada a partir do teor de carbono orgânico total do solo quantificado por dicromatometria. Para o cálculo da matéria orgânica considerou-se que, o acúmulo de C na matéria orgânica humificada do solo é em torno de 58 %. O teor de carbono orgânico total do solo (Corg) foi determinado conforme o manual de análises de solo (EMBRAPA, 1997).

Determinação do nitrogênio total (NT) e cálculo da relação C:N: O nitrogênio total no solo (NT) foi determinado de acordo com Bremner; Mulvaney (1982). A relação C:N é utilizada como indicativo da qualidade da matéria orgânica (STEVENSON; COLE, 1999), e foi calculada pela relação entre o carbono orgânico total (Corg) e o nitrogênio total (NT).

Análises Estatísticas

Para a análise estatística dos dados foi utilizado o seguinte modelo misto descrito em Littel et al. (1996).

$$y_{ijk} = \mu + A_i + E_j + (AE)_{ij} + H_k + (EH)_{jk} + A_i H_k (E_j) + \varepsilon_{ijk}$$

Onde: μ : constante inerente às observações;

A_i : efeito da árvore i ;

E_j : efeito da época j ;

$(AE)_{ij}$: efeito da interação árvore * época;

H_k : efeito da distância horizontal k ;

$(EH)_{jk}$: efeito da interação época * distância horizontal;

$A_i H_k (E_j)$: efeito da interação árvore * distância * época, e

ε_{ijk} : erro aleatório.

O efeito de árvore é aleatório e os demais são fixos.

Por se tratar de um estudo observacional e não de um experimento, não se conhece a estrutura das variâncias e covariâncias dos dados e por isso foi conduzido um estudo estatístico para se indicar a melhor estrutura. Além disso, as médias das observações de carbono microbiano, respiração basal, quocientes metabólico e microbiano, matéria orgânica, nitrogênio total e relação C:N foram submetidas a testes

para verificar se seguiam a distribuição normal, e para verificar a homogeneidade de variâncias. As técnicas para os tratamentos das variáveis observadas estão descritas em Littel et al. (1996). O método de análise foi o de máxima verossimilhança restrita, via procedimento PROC MIXED do software SAS versão 9.1 (SAS, 2008) e as médias foram comparadas pelo teste t ($p < 0,05$).

Optou-se por esse modelo porque ele pode representar o que está ocorrendo com as variáveis observadas na natureza. Para a avaliação do estudo observacional as árvores foram consideradas como os blocos (blocos casualizados), e os dados foram observados em duas épocas e em três distâncias para se estudar o comportamento dos atributos microbianos do solo em relação ao efeito sazonal (avaliação em épocas contrastantes, verão e inverno seco) e espacial (avaliação em relação ao distanciamento horizontal do estipe das palmeiras).

Foi utilizado o programa Sigma Plot versão 10.1 para a elaboração dos gráficos das Figuras 2 e 3.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos microbianos, químicos e suas relações foram influenciados pelas épocas de coleta (chuva e seca) e pelo distanciamento (50, 150 e 250 cm) em relação à base do estipe das macaubeiras conforme resultados apresentados nas (Tabelas 1; 2; 3; e Figuras 2 e 3).

O carbono microbiano (Cmic), os quocientes metabólico (qCO_2) e microbiano (qMic), a matéria orgânica (MOS) e a relação C:N foram altamente significativos para o efeito sazonal ($p < 0,0001$), e a respiração basal foi significativa a 5 %. O nitrogênio total não se alterou ($p > 0,05$) em função das épocas de coleta. Houve efeito espacial para os atributos microbianos (Cmic, RB e qCO_2), e químicos (MOS e NT). As relações qMic e C:N não foram influenciadas pelas coletas a diferentes distâncias da base do estipe das macaubeiras (Tabela 1).

Não houve interação entre a época de coleta e o distanciamento em relação ao estipe das macaubeiras para os atributos avaliados. Esse comportamento condiz com o modelo do estudo observacional, pois o solo foi coletado em diferentes épocas a determinada distância da base do estipe e não era esperado que houvesse interação entre os efeitos fixos (época * distância) (Tabela 1).

TABELA 1 - Valores de F da análise de variância para carbono microbiano (Cmic); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic); matéria orgânica (MOS), nitrogênio total (NT) e relação C:N, na camada 0 - 10 cm de um Gleissolo, em épocas contrastantes a diferentes distâncias em relação ao estipe de macaubeiras nativas.

	Cmic	RB	qCO ₂	qMic	MOS	NT	C:N
⁽²⁾ Valores de F e magnitude das significâncias							
⁽¹⁾ Época	55,98 ^{****}	10,07 [*]	41,83 ^{****}	99,90 ^{****}	52,89 ^{****}	0,24 ^{ns}	43,24 ^{****}
(E)							
Distância	5,69 ^{**}	32,04 ^{****}	6,30 ^{**}	0,08 ^{ns}	7,85 ^{**}	9,73 ^{****}	0,76 ^{ns}
(D)							
E * D	0,15 ^{ns}	0,61 ^{ns}	1,10 ^{ns}	0,96 ^{ns}	0,23 ^{ns}	1,02 ^{ns}	3,25 ^{ns}

⁽¹⁾Efeitos fixos: épocas de coleta (chuva e seca); distâncias em relação ao estipe das macaubeiras (50, 150 e 250 cm); interação (época * distância).

⁽²⁾Valores seguidos por: (****), (***) , (**) , e (*) mostraram efeitos, significativos a 0,01 ($p < 0,0001$); 0,1 ($p < 0,001$); 1 ($p < 0,01$); e a 5 % ($p < 0,05$), respectivamente; e (ns) não significativo ao nível de 5 % de probabilidade para o teste F.

Em geral, observou-se que o carbono e o quociente microbianos aumentaram na época de menor disponibilidade hídrica; no entanto a atividade microbiana, quociente metabólico, teor de matéria orgânica e a relação C:N reduziram durante o mesmo período (Tabela 2).

TABELA 2 - Comparação das diferenças entre as médias dentro de cada distância para as variáveis, carbono microbiano (Cmic); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic); matéria orgânica (MOS), Nitrogênio total (NT) e relação C:N, na camada 0 - 10 cm de um Gleissolo sob macaubeiras nativas.

Diferenças entre as médias a três distâncias em relação ao estipe de macaubeiras para épocas contrastantes (chuva e seca)						
Distância do estipe (cm)						
	50		150		250	
	V	I	V	I	V	I
⁽¹⁾ Cmic	⁽²⁾ 456,71b	674,05a	359,43b	575,02a	374,12b	558,91a
RB	51,20a	40,20b	38,86a	31,27b	34,01a	27,00a
qCO ₂	0,12a	0,06b	0,11a	0,06b	0,10a	0,05b
qMic	1,33b	2,44a	1,16b	2,64a	1,24b	2,44a
MOS	60,96a	48,26b	54,42a	38,53b	53,85a	39,50b
NT	2,36a	2,20a	1,00a	2,05a	1,93a	1,94a
C:N	14,96a	13,04b	15,89a	10,80b	16,15a	11,94b

⁽¹⁾Unidades das variáveis microbiológicas - (Cmic = (mg C kg⁻¹); RB = (mg C-CO₂ kg⁻¹ d⁻¹); qCO₂ = (mg C-CO₂ mg Cmic⁻¹ d⁻¹); qMic = (%); matéria orgânica = (g C kg⁻¹); nitrogênio total = (g N kg⁻¹) e relação C:N = (%).

⁽²⁾Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas (comparação das épocas em cada distância), não diferem entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste t.

Analisando-se o efeito das épocas de coleta (chuva e seca) para cada distância em relação à base do estipe das macaubeiras (Tabela 2), em todas as distâncias do estipe avaliadas, o Cmic foi maior no período seco e variou de 674,05 a 558 mg C kg⁻¹ solo e as menores diferenças entre as duas épocas, foi na distância de 250 cm.

A distribuição das chuvas e a umidade do solo são fatores de regulação da biomassa microbiana (GAMA-RODRIGUES et al., 2005). No presente estudo, constatou-se que os atributos microbiológicos e suas relações são mais influenciados pela disponibilidade de água no sistema, do que pelo distanciamento horizontal em relação ao estipe das palmeiras.

Nesse estudo foram observados teores médios de carbono microbiano de 359,43 mg C kg⁻¹ solo, a 150 cm do estipe no período chuvoso a 674,05 mg C kg⁻¹ solo a 50 cm do estipe na época seca. Os valores obtidos para o Cmic nesse estudo estão dentro da variação relatada por outros autores, em estudos de solos sob florestas em diversas condições edafoclimáticas (MAO; ZENG, 2010; ALVES et al., 2011; FALL et al., 2012; CUNHA et al., 2012).

A respiração basal do solo (RB), para as distâncias de 50 e 150 cm do estipe foi maior na época chuvosa, ao passo que na distância de 250 cm, a RB foi semelhante nas duas épocas avaliadas. O qCO₂ em todas as distâncias do estipe foi maior na época chuvosa que na seca e variou de 51 mg C kg solo⁻¹ dia⁻¹ a 31,27 mg C kg solo⁻¹ dia⁻¹. Os atributos microbiológicos (Cmic, qCO₂ e qMic) foram altamente significativos a 50 cm do estipe, e a matéria orgânica, a respiração microbiana e a relação C:N foram significativas. A 150 centímetros da base do estipe o Cmic, qCO₂, qMic, MOS e C:N foram altamente influenciados ($p < 0,0001$) pela coleta na época chuvosa e seca e a respiração basal foi significativa a 5 %. A 250 centímetros do estipe o qCO₂, qMic, MOS e C:N sofreram efeito sazonal ao nível de 0,01 %, e o Cmic a 0,1 %, entretanto a respiração basal não se alterou em função da época de coleta a 250 cm do estipe. O teor de nitrogênio total não foi influenciado pelas épocas de coleta a nenhuma distância em relação ao estipe das macaubeiras (Tabela 2).

Na (Tabela 3) são apresentados os contrastes entre as distâncias em relação ao estipe das macaubeiras dentro de cada época. Não se observou efeito espacial nas épocas de coleta no quociente microbiano. Analisando-se a distância horizontal dentro da época chuvosa observou-se que para a comparação das distâncias a 50 e 150 cm do estipe; houve efeito altamente significativo, para a respiração basal; e significativo para o nitrogênio total e carbono microbiano. Os quocientes metabólico e microbiano, a matéria orgânica e a relação C:N não foram influenciados pela coleta a 150 centímetros da base do estipe das macaubeiras. Para a comparação das distâncias a 50 e 250 cm do estipe, houve efeito altamente significativo, para a respiração basal, e significativo para o nitrogênio total, quociente metabólico e matéria orgânica. O carbono, quociente

microbianos e a relação C:N não foram influenciados pela coleta a 250 centímetros. A comparação das distâncias a 150 e 250 cm do estipe, mostrou efeito significativo a 5 %, apenas para o quociente metabólico.

TABELA 3 - Comparação das diferenças entre as médias dentro de cada época (chuva e seca) para as variáveis, carbono microbiano (Cmic); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic); matéria orgânica (MOS), Nitrogênio total (NT) e relação C:N, na camada 0 - 10 cm de um Gleissolo sob macaubeiras nativas.

Valores médios dos atributos para a coleta na época chuvosa			
Distância do estipe (cm)			
Variáveis	50	150	250
⁽¹⁾ Cmic	⁽²⁾ 456,71a	359,43b	374,12ab
RB	51,20a	38,86b	34,01bc
qCO ₂	0,12a	0,11a	0,10b
qMic	1,33a	1,16a	1,24a
MOS	60,96a	54,42ab	53,85b
NT	2,36a	1,00b	1,93bc
C:N	14,96a	15,89a	16,15a

Valores médios dos atributos para a coleta na época seca			
Distância do estipe (cm)			
Variáveis	50	150	250
⁽¹⁾ Cmic	⁽²⁾ 674,05a	575,02b	558,91bc
RB	40,20a	31,27b	27,00bc
qCO ₂	0,06a	0,06a	0,05a
qMic	2,44a	2,64a	2,44a
MOS	48,26a	38,53b	39,50bc
NT	2,20a	2,05ab	1,94bc
C:N	13,04a	10,80b	11,95ab

⁽¹⁾Unidades das variáveis microbiológicas - (Cmic = (mg C kg⁻¹); RB = (mg C-CO₂ kg⁻¹ d⁻¹); qCO₂ = (mg C-CO₂ mg Cmic⁻¹ d⁻¹); qMic = (%); matéria orgânica = (g C kg⁻¹); nitrogênio total = (g N kg⁻¹) e relação C:N = (%).

⁽²⁾Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na linha (comparação das distâncias), não diferem entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste t.

Analisando-se o efeito espacial dentro da época seca (Tabela 3) observou-se que no contraste 50 vs 150 Cmic; RB, MOS e C:N diferenciaram-se. A diferença entre as médias das variáveis observadas a 50 e a 250 cm do estipe na seca mostrou que o carbono microbiano, a respiração basal, a matéria orgânica e o nitrogênio total foram diferentes para o contraste estudado e a relação C:N não mostrou efeito significativo para distinguir essas distâncias. Observou-se que quociente microbiano não sofre influência espacial em nenhuma época de coleta. O quociente metabólico não sofreu efeito espacial durante o período com menor disponibilidade hídrica. Não foram observadas diferenças entre os atributos estudados durante o período seco para as distâncias a 150 e 250 cm. Isso indica que a coleta para avaliação e monitoramento de

atributos microbiológicos em sistemas envolvendo macaubeiras durante a época seca deve ser realizado até 150 cm do estipe.

Fall et al. (2012) relatam que a redução na biomassa microbiana do solo em relação à profundidade e à distância do caule pode ser atribuída a quantidade de nutrientes como carbono e nitrogênio, e também pode estar relacionada com a biomassa radicular de *Acacia senegal*. A diversidade e o número de microrganismos na rizosfera são determinados pela composição e concentração de exsudados radiculares, pois são fonte de nutrientes para os microrganismos (MARCHNER et al., 2004).

Quando se estuda a comunidade microbiana em solos de mata ou vegetação nativa de Cerrado, já se espera encontrar valores relativamente maiores quando comparados a solos com outros tipos de cobertura como os solos cultivados, já que essa microbiota é favorecida pela cobertura vegetal que propicia maior deposição de resíduo orgânico, fornecendo maior fonte de nutrientes para o desenvolvimento da comunidade microbiana (ALVES et al., 2011). Entretanto, mesmo no cerrado nativo, onde provavelmente existiria maior estabilidade na dinâmica de carbono no solo, ou seja, equilíbrio entre a entrada e a decomposição de liteira, Simões et al. (2010) encontraram maiores valores de C_{mic} e q_{mic} em Latossolo Amarelo, em Roraima, sob cobertura de *Acacia mangium* em relação ao cerrado nativo. Os autores justificam que houve uma ativação da biomassa microbiana decorrente do fornecimento de substrato de melhor qualidade nutricional proporcionado pela deposição de liteira das plantas de acácia (SIMÕES et al. 2010). Entretanto, Cunha et al. (2012) relatam que o maior valor de C_{mic} em mata é reflexo de uma situação particular para a microbiota do solo nesse sistema, que é estimulada pelo fornecimento contínuo de materiais orgânicos com diferentes graus de suscetibilidade à decomposição, originados da vegetação.

Nesse estudo, observou-se que o teor de carbono microbiano aumentou no período de menor disponibilidade hídrica, com valores médios de 47,6 % a 50 cm de distância do estipe; 60 % a 150 cm do estipe e 49,4 % a 250 cm do estipe, respectivamente.

O aumento do C_{mic} na época seca no presente trabalho foi diferente dos resultados apresentados por Fall et al. (2012) que verificaram menores valores para C_{mic} durante a seca e atribuíram esse resultado a menor disponibilidade hídrica. A variação sazonal na biomassa microbiana é devido à variação no potencial de água e substrato carbonáceo (FORD et al., 2007). Nesse estudo, por se tratar de um Gleissolo, fatores como a falta de oxigênio e o baixo teor de nitrogênio possivelmente inibiram a

atividade biológica, limitando a oxidação química e biológica da matéria orgânica no período chuvoso, o que pode ter concorrido para uma menor imobilização de carbono nas células microbianas e com isso o conteúdo de carbono microbiano foi menor mesmo na época de maior teor de água no solo. Outra possibilidade é que as adições de C oxidável nesse sistema não são suficientes para atender à demanda energética para a manutenção da biomassa existente, ocasionando decréscimos no Cmic.

Lourente et al. (2011) observaram, que os teores de Cmic foram significativamente maiores no verão (71 %, em média) para os sistemas de uso do solo estudados: vegetação nativa de cerrado, pastagem, semeadura direta, reflorestamento e sistema convencional. Piao et al. (2000), justificam que durante a estação seca, parte da biomassa microbiana morre e, com a retomada das chuvas e o incremento da umidade do solo, a biomassa sobrevivente utiliza matéria orgânica acumulada no período, incluindo as células mortas, promovendo maior atividade microbiana durante o período chuvoso. O efeito da temperatura também deve ser considerado, porque no verão, a elevação da temperatura e a maior precipitação pluviométrica favorecem o aumento da biomassa microbiana do solo (ESPÍNDOLA et al., 2001).

Um aumento no carbono microbiano e conseqüente redução do quociente metabólico (Figura 2), corrobora com os estudos de Frazão et al. (2010); Mao; Zeng (2010) e sugere que o solo do ecossistema está se tornando mais estável.

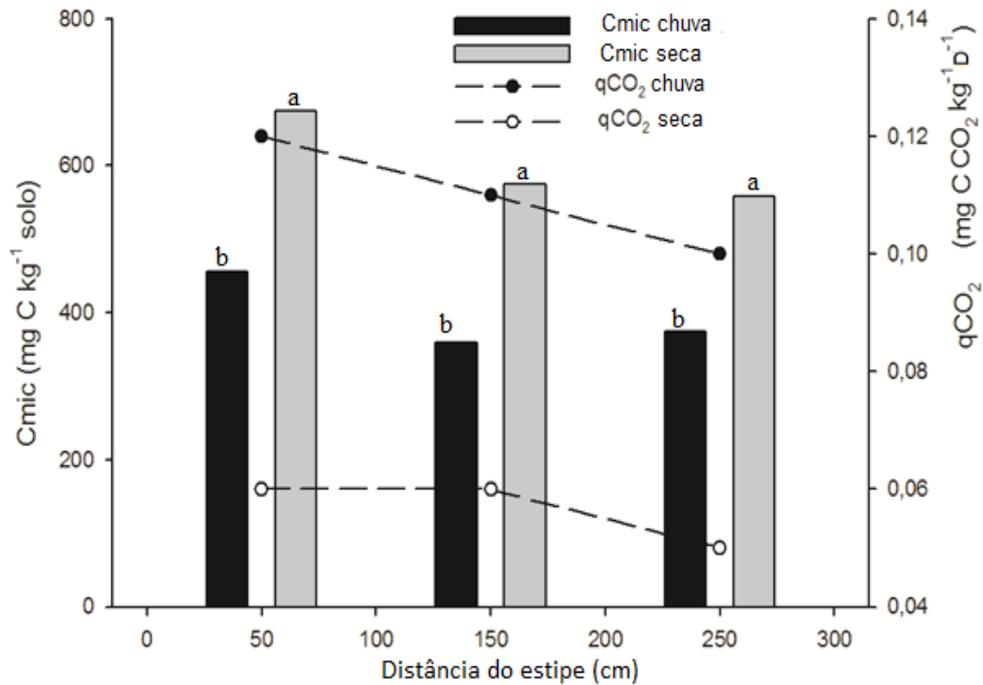


FIGURA 2 - Carbono microbiano (Cmic) e quociente metabólico (qCO₂) na camada 0 a 10 cm, a 50, 150 e 250 cm de distância em relação ao estipe das macaubeiras no período chuvoso e seco.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste t, e comparam as épocas contrastantes dentro de cada distância.

No presente estudo ocorreu maior teor de Cmic durante o período seco e, por se tratar de um sistema sem interferência antrópica, que mantém o solo coberto pela liteira durante essa época, conservando a umidade e reduzindo a amplitude de variação da temperatura, provavelmente a menor disponibilidade de água durante o inverno não reduziu a atividade da população microbiana presente no solo desse sistema. Além disso, a menor relação C:N encontrada na época seca, pode ter favorecido a maior entrada de C prontamente mineralizável com posterior imobilização de C nas células microbianas constatados pela redução do teor de MOS na seca associado a um valor médio (2,5 %) para o qMic e um baixo qCO₂ indicando maior eficiência (menores perdas de CO₂) da microbiota presente no sistema. Devido à dinâmica apresentada pela microbiota nesse estudo, recomenda-se a inclusão de macaubeiras em programas de recuperação de pastagens degradadas, visto que na época em que o bioma Cerrado apresenta as maiores emissões de CO₂ devido às queimadas (período seco), ocorrem maior eficiência e estabilidade da microbiota presente na mata de macaubeiras nativas, que geralmente ocorrem associadas a pastagens neste tipo de solo.

Nesse estudo observou-se uma variação no valor médio da respiração microbiana de 51 mg C-CO₂ kg⁻¹ dia⁻¹ a 50 cm de distância do estipe, na época chuvosa, para 27 mg C-CO₂ kg⁻¹ dia⁻¹ a 250 cm de distância do estipe, na época seca (Tabela 3).

A atividade metabólica da biomassa microbiana, expressa pela respiração basal (oxidação da matéria orgânica por microrganismos aeróbios do solo) e pelo quociente metabólico (quantidade de carbono oxidado por grama de carbono da biomassa microbiana por certo tempo) variou nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo adotados nos estudos de Silva et al. (2010). Os autores reportaram uma maior atividade da microbiota, possivelmente estimulada pela constante deposição de substratos orgânicos e grande quantidade de raízes.

Lourente et al. (2011) relatam que o aumento da taxa de respiração basal (C-CO₂) indica que a biomassa microbiana estaria atuando na decomposição da matéria orgânica do solo, com imobilização de nutrientes em sua biomassa e liberação de partes destes constituintes para a solução do solo. Menores valores no inverno sugerem que a biomassa microbiana está atuando como compartimento de reserva de nutrientes evitando-se perdas nesse período.

Estudos de Silva et al. (2010), concluíram que a RB, embora tenha evidenciado maior atividade da biomassa microbiana no cerrado nativo, não foi um indicador eficiente para refletir o efeito dos diferentes sistemas de manejo no solo. Neves et al. (2009) não verificaram diferenças significativas entre os sistemas avaliados e o cerrado nativo para a respiração basal e quociente metabólico. Contudo, Hungria et al. (2009); Meriles et al. (2009) e Frazão et al. (2010) reportaram uma tendência de maior atividade respiratória da biomassa microbiana nos sistemas com menor intensidade de manejo do solo.

O quociente metabólico (qCO₂) expressa a energia necessária para a manutenção da atividade metabólica em relação à energia necessária para a síntese da própria biomassa, sendo considerado um índice metabólico para avaliar o efeito de condições de estresse sobre a atividade microbiana (ANDERSON; DOMSCH, 1993; GAMA-RODRIGUES et al., 2008).

Nesse estudo, foi observado que no geral, a taxa média de respiração específica na época chuvosa foi de 0,11 mg C-CO₂ mg biomassa⁻¹ dia⁻¹ e no período seco foi de 0,05 mg C-CO₂ mg biomassa⁻¹ dia⁻¹ (Tabela 3).

Sabe-se que, em termos gerais, 2/3 do C decomposto é liberado como CO₂, enquanto 1/3 é incorporado no tecido microbiano (PAUL, 2007). Entretanto, a

diminuição do quociente metabólico sugere a ocorrência de uma comunidade microbiana mais eficiente na utilização de compostos orgânicos, liberando menos C na forma de CO₂ e incorporando mais C nos tecidos microbianos. Assim, alto qCO₂ poderia estar associado a uma condição de estresse no ambiente, enquanto que baixo qCO₂ pode refletir um ambiente mais estável. A diminuição nesse quociente pode ter implicações práticas na agricultura, pois se menos C é respirado, uma menor quantidade de C é liberada do solo, podendo ocorrer acúmulo de C no solo (BALOTA et al., 2004).

Lourente et al. (2011) verificaram que o quociente metabólico só foi diferente significativamente entre a vegetação nativa e os demais sistemas de uso do solo durante o inverno. No verão não foram constatadas diferenças significativas entre os sistemas de uso, e ocorreu redução do qCO₂ para a vegetação nativa e incremento para os sistemas de cultivos. A redução nos valores do qCO₂ para a vegetação nativa, no verão, indica que a biomassa microbiana está sendo mais eficiente, ou seja, está havendo menor perda de CO₂ por unidade de biomassa.

Os sistemas que promovam menores qCO₂ devem ser estimulados, pois nesses sistemas a biomassa microbiana está em equilíbrio, com menores perdas de dióxido de carbono (CO₂) pela respiração, e, com isso, maior é a incorporação de C à biomassa microbiana (GAMA-RODRIGUES, 2008).

No presente estudo, a contribuição do carbono orgânico para a formação do carbono da biomassa microbiana foi influenciada pela época de coleta e aumentou 83,5 %; 127,6 % e 96,8 %, na época seca, respectivamente a 50, 150 e 250 cm da base do estipe (Tabela 3).

O quociente microbiano (qMic), em condições normais, varia de 1 a 4 % e valores inferiores a 1 % podem ser atribuídos a algum fator limitante à atividade da biomassa microbiana (JAKELAITIS et al., 2008). Tem sido sugerido que em torno de 2,2 % expressaria um equilíbrio no solo (JENKINSON; LADD, 1981). Esta relação pode indicar a qualidade da matéria orgânica do solo (TÓTOLA; CHAER, 2002).

Os valores de qMic obtidos durante o período seco, foram 2,44 % a 50 cm do estipe; 2,64 % a 150 cm e 2,44 % a 250 cm, portanto, a eficiência da biomassa em utilizar o carbono orgânico do solo, em mata de macaubeiras na época de reduzida disponibilidade de água no solo, não se altera conforme ocorre o distanciamento em relação ao estipe.

A relação $C_{mic}:C_{org}$ reflete quanto do C orgânico do solo está imobilizado na biomassa microbiana e mostra o potencial de reserva desse elemento no solo (CARNEIRO et al., 2009).

O quociente microbiano representa o acúmulo de carbono nos microrganismos sem alterações no estoque de carbono do solo (GAMA-RODRIGUES et al., 1997). Esse comportamento corrobora com o resultado altamente significativo para épocas contrastantes encontrado para essa variável no presente estudo.

Lourente et al. (2011) não verificaram efeito dos sistemas de manejo sobre o q_{Mic} , independente do período de avaliação (inverno e verão). Neves et al. (2009) observaram maior valor de q_{Mic} , na camada 0-5 cm, em pastagem plantada (7,9 %), apesar de não diferir estatisticamente dos sistemas de cerrado nativo (6,5 %) e floresta plantada de eucalipto (6,4 %). Silva et al. (2010) afirmam que a baixa disponibilidade ou qualidade do substrato orgânico também ocasionam baixos valores de q_{Mic} .

A matéria orgânica do solo (MOS) é constituída por C, H, O, N, S e P, sendo que o carbono (C) compreende cerca de 58 % da MOS (STEVENSON; COLE, 1999), portanto fatores que influenciam os teores de C no solo são compatíveis para verificar mudanças no comportamento da matéria orgânica. Sendo assim, autores como Cunha et al. (2012); Pôrto et al. (2009); Jakelaitis et al. (2008) e Albuquerque et al. (2005) verificaram que o carbono orgânico do solo sob mata é maior do que sob outras coberturas, provavelmente pelo aporte de resíduos orgânicos, não revolvimento do solo e reduzida erosão hídrica e também pela maior cobertura do solo pela liteira. Nesse estudo, o teor de matéria orgânica no solo variou de 60,96 g kg⁻¹ a 50 cm de distância do estipe, na época chuvosa e 38,53 g kg⁻¹ a 150 cm do estipe no período seco. Sob o efeito sazonal, a matéria orgânica do solo mostrou-se altamente significativa. Foi significativa dentro da época chuvosa para a distância 50 vs 250 com valores médios de 60,96 g kg⁻¹ e 53,85 g kg⁻¹ (redução da ordem de 11,67 %, conforme se distanciou 200 cm) e na época seca 50 vs 150 com valores médios de 48,26 g kg⁻¹ e 38,53 g kg⁻¹ (redução da ordem de 20,16 %, conforme se distanciou a 100 cm) e 50 vs 250 com valores médios de 48,26 g kg⁻¹ e 39,50 g kg⁻¹ (redução da ordem de 18,15 %, conforme se distanciou 200 cm).

Diniz et al. (2010a) verificaram que houve influência do distanciamento da base do estipe, em macaubeiras nativas, no comportamento da MOS para as camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm. Em geral, houve uma redução no teor de matéria orgânica, conforme ocorreu o distanciamento do estipe e o teor de MOS foi menor na camada

subsuperficial. Esses resultados, provavelmente, ocorreram devido ao maior aporte de substrato orgânico na região mais próxima do estipe das palmeiras.

Nesse estudo, os teores de nitrogênio no solo variaram entre 2,36 g kg⁻¹ e 1,93 g kg⁻¹ na época chuvosa, respectivamente, a 50 cm e 250 cm do estipe. Esses resultados foram menores que o teor médio de nitrogênio (3,8 g kg⁻¹) relatado em Gleissolo por Santos (2007). No geral, em dados absolutos, a maior variação ocorreu à distância de 50 cm que apresentou valores de 2,36 g kg⁻¹ na época chuvosa e 2,20 g kg⁻¹ na época seca. Houve efeito espacial conforme apresentado na (Figura 3).

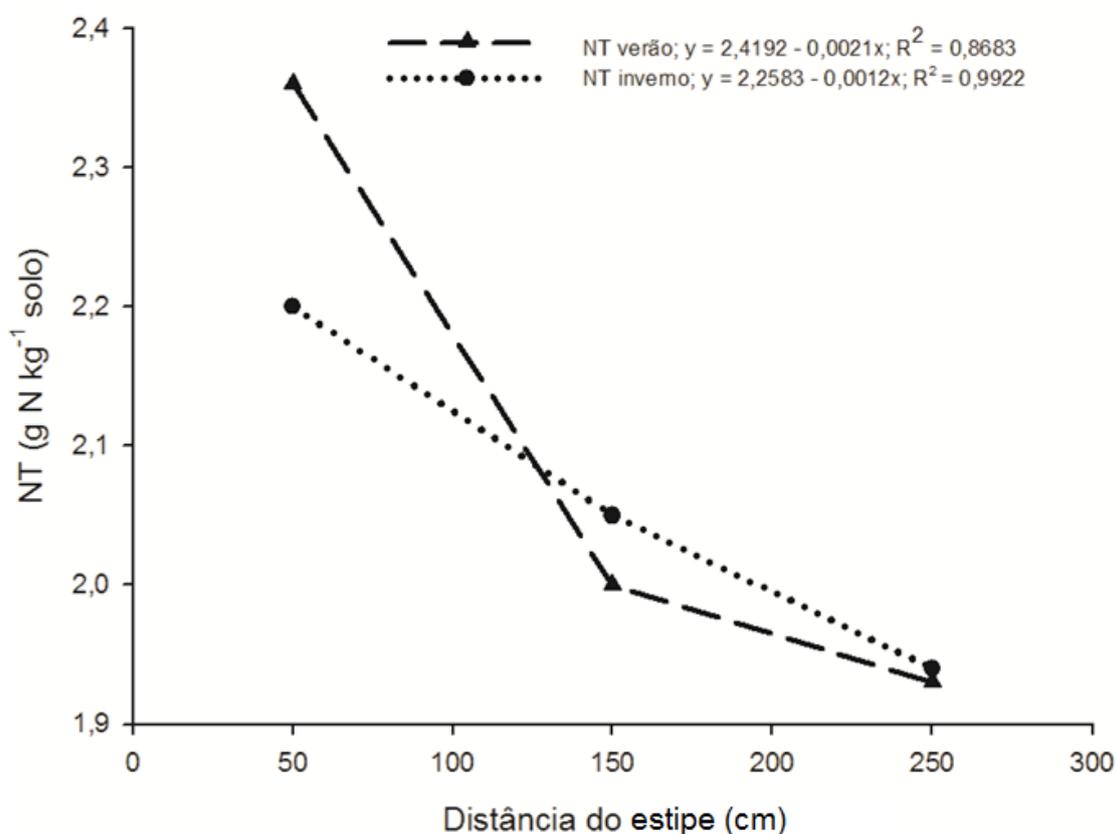


FIGURA 3 - Efeito espacial do nitrogênio total (NT) na camada 0 a 10 cm, a 50, 150 e 250 cm de distância em relação ao estipe das macaubeiras no período chuvoso e seco.

No presente estudo, observou-se que o nitrogênio não foi um atributo adequado para aferir efeito sazonal em mata de macaubeiras no Cerrado. Provavelmente, os resíduos vegetais depositados no solo sob os ecossistemas naturais foram constituídos principalmente por substratos orgânicos de decomposição rápida, o que não contribuiu para incrementos nos estoques de N total no solo (PULRONIK et al., 2009). Entretanto, infere-se que por se tratar de um elemento estável, com pouca variação em relação aos períodos de coleta, o nitrogênio total pode ser um bom indicador de modificações nos ecossistemas. Além disso, os métodos de detecção deste elemento são menos

susceptíveis a variações se comparado aos métodos de determinação de carbono no solo. Outros resultados como o de Araújo (2003), corroboram com as observações obtidas nesse estudo, pois a autora, trabalhando em solos do terço superior de uma topossequência sob pastagem, no norte fluminense, não encontrou diferença significativa entre as épocas de coleta (verão e inverno) para o C orgânico e N total do solo. Gama-Rodrigues et al. (2005) constataram que em solos com plantações de eucalipto com sete anos de idade, os teores de C orgânico e N total foram mais fortemente influenciados pelo teor de argila do que pela própria biomassa microbiana, durante as épocas de amostragem (início e final da seca e chuva). Os autores também sugeriram que a influência das condições ambientais na atividade microbiana e no N_{mic} e C_{mic} foi maior do que para os valores totais de N e C, aparentemente mais estáticos ao longo do ano nos ambientes estudados.

Nesse estudo, a relação C:N sofreu efeito sazonal e os menores valores foram observados na seca (Tabelas 1 e 2).

A relação C:N é um indicador importante da decomposição da matéria orgânica do solo e fornece informação sobre os nutrientes essenciais para a atividade dos microrganismos do solo (SANTOS, 2007). Os resultados apresentados nesse estudo são compatíveis com a relação C:N (10 a 15/1) apresentada por Stevenson (1994) em solos tropicais não revolvidos.

Santos (2007) em estudo de tipologias em Gleissolo, quando comparado ao Cambissolo relata que a média da relação C:N na camada 0 a 5 cm foi 14,08 e justifica que as médias mais altas de relação C:N em todas as tipologias se deve ao regime de saturação hídrica do solo, determinando um ambiente redutor pela falta ou escassez de oxigênio. Os maiores valores da relação C:N em Gleissolo parece estar associado ao aspecto hidromórfico do solo que dificultaria a degradação do carbono e também pela presença constante do lençol freático no perfil do solo, que facilitaria as perdas de N por lixiviação.

Diniz et al. (2010b), em estudos sobre o efeito da distância da base do estipe na relação entre o carbono orgânico e nitrogênio total, em um solo sob macaubeiras nativas verificaram que a relação C:N sofre influência espacial em relação ao distanciamento da base do estipe. Em geral, houve uma redução na relação C:N, conforme ocorreu o distanciamento em relação à base do estipe das palmeiras.

3.4. CONCLUSÕES

- 1.** O Cmic, RB, qCO₂ e a MOS são sensíveis à variação sazonal e espacial em mata de macaubeiras no Cerrado.
- 2.** A relação C:N do solo é alterada em função da época de coleta.
- 3.** O NT apresenta variação espacial em mata de macaubeiras no Cerrado, mas não sofre efeito sazonal.
- 4.** A microbiota presente no solo sob macaubeiras foi mais eficiente e se manteve mais equilibrada durante o período seco, apresentando maiores teores de Cmic, menor qCO₂, maior Cmic:Corg.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. A.; ARGENTON, J.; BAYER, C.; WILDNER, L do P.; KUNTZE, M. A. G. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.415-424, 2005.

ALEF, K.; NANNIPIERI, **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**, London: Academic Press, 576 p., 1995.

ALVES, T dos S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.33, n.2, p.341-347, 2011.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>> Acessado em: 15/02/2013.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.25, n.3, p.393-395, 1993.

ARAÚJO, S. P. **Atributos biológicos do solo sob diferentes coberturas vegetais amostrados em duas estações do ano numa topossequência no Noroeste Fluminense – RJ**. 2003. 51 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2003.

ASHARIE, Y.; ZECH, W.; GUGGENBERGER, G.; MAMO, T. Soil aggregation, and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n.1, p.101-108, 2007.

BALOTA, E. L.; COLLOZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v.77, p.137-145, 2004.

BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Nitrogen total. In: **Methods of soil analysis**. 2ed. American Society of Agronomy. Madison, USA. Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Agronomy Monograph n.9, p.591-641, 1982.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. de; REIS, E. F. dos; PEREIRA, H. S. AZEVEDO, W. R. de. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.1, p.147-157, 2009.

CUNHA, E. de Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. de B.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção

orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 56-63, 2012.

DIAS, H. C. T.; SATO A. Y., OLIVEIRA NETO, S. N. de, MORAIS, T. de C., FREIRE A. e BENTO, P. S. **Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, MG: EPAMIG, v.32, n.265, p.52-60, 2011.

DINIZ, L. T.; RAMOS, M. L. G.; MELO, A. A.; LIMA, L. C.; SILVA, D. E.; COIMBRA, K. das G.; ALENCAR, C. M. Comportamento da matéria orgânica em relação à distância da base do caule em um Gleissolo sob macaubeiras nativas associadas à pastagem, no cerrado goiano. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2010, Natal. **Anais...** Centro Convenções Natal – RN. 2010a. CD-ROM.

DINIZ, L. T.; RAMOS, M. L. G.; MELO, A. A.; LIMA, L. C.; SILVA, D. E.; ALENCAR, C. M. Efeito da distância da base do caule na relação entre o carbono orgânico e nitrogênio total, em um solo sob macaubeiras nativas associadas à pastagem, no cerrado goiano. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2010, Natal. **Anais...** Centro Convenções Natal – RN. 2010b. CD-ROM.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro - CNPS, 306p., 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Classificação do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ed. Rio de Janeiro-CNPS, 212p., 1997.

ESPÍNDOLA, J. A. A.; ALMEIDA, de D. L.; A. de. J.A.A.; GUERRA, J. G. M.; SILVA, da E. M. R. Flutuação sazonal da biomassa microbiana e teores de nitrato e amônio de solo coberto com *Paspalum notatum* em um agroecosistema. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v.8, n.1, p.104-113, 2001.

FALL, D.; DIOUF, D.; ZOUBEIROU, A. M.; BAKHOUM, N.; FAYE, A.; SALL, S. N. Effect of distance and depth on microbial biomass and mineral nitrogen content under *Acacia Senegal* (L.) Willd. Trees. **Journal of Environmental Management**, v. 95, p.S260-S264, 2012.

FORD, D. J.; COOKSON, W. R.; ADAMS, M. A.; GRIERSON, P. F. Role of soil drying in nitrogen mineralization and microbial community function in semi-arid grasslands of north-west Australia. **Soil Biology and Biochemistry**, v.39, n. 7, p.1557-1569, 2007.

FRAZÃO, L. A.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Inorganic nitrogen, microbial biomass and microbial activity of a sandy Brazilian Cerrado, soil under different land uses. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.135, p.161-167, 2010.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; da; GAMA-RODRIGUES, A. C. da; BARROS, N. F. de; Biomassa microbiana de carbono e de nitrogênio de solos sob diferentes coberturas florestais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.3, p.361-365, 1997.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F. de; GAMA-RODRIGUES A. C.; SANTOS, G. A. S. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p. 893-901, 2005.

GAMA-RODRIGUES, S. F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS G. A. & CAMARGO, F. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

GAMA-RODRIGUES, E. F. da; GAMA-RODRIGUES, A. C. da; PAULINO, G. M.; FRANCO, A. A. Atributos químicos e microbianos sob diferentes coberturas vegetais no norte do estado do Rio de Janeiro, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1521-1530, 2008.

HARRIS, J. A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. **European Journal Soil Science**, Oxford, v.54, n.4, p.801-808, 2003.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO JÚNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long term experiment with threes soil tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil and Ecology**, v.42, p.288-296, 2009.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A. A. da; SANTOS, A. A. dos, VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.38, n.2, p.118-127, 2008.

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. **Microbial biomass in soil: measurement and turnover**. In: PAUL, E. A. & LADD, J. N. (ed.). *Soil Biochemistry*, New York: Marcel Dekker, p.415-471, 1981.

LITTEL, R. C.; MILLIKEN, G. A.; STROUP, W. W.; WOLFINGER, R. D. **SAS System for Mixed Models**. 1996.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; ALOVISI, A. M. T.; GOMES, S. F.; GASPARINE, A. S.; NUNES, C. M. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.41, n.1, p.20-28, 2011.

MAO, R.; ZENG, D. H. Changes in soil particulate organic matter, microbial biomass, and activity following afforestation of marginal agricultural lands in a semi-arid area of northeast China. **Environmental Management**, v.46, p.110-116, 2010.

MARISOLA FILHO, L. A. Cultivo e processamento de coco macaúba para a produção de biodiesel. Viçosa – MG, **Centro de Produções Técnicas – CPT**, 333p., 2009.

MARSCHNER, P.; CROWLEY, D. E.; YANG, C. H. Development of specific rhizosphere bacterial communities in relation to plant species, nutrition and soil type. **Plant and Soil**, v. 261, p. 199-208, 2004.

MERILES, J. M.; VARGAS G., S.; CONFORTO, C.; FIGONI, G.; LOVERA, E.; MARCH, G. J.; GUZMA'N, C. A. Soil microbial communities under different soybean cropping systems: Characterization of microbial population dynamics, soil microbial activity, microbial biomass and fatty acid profiles. **Soil and Tillage Researcrh**, v.103, p.271-281, 2009.

MOREIRA, F. M de S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. Ed. Atual. E ampl. Lavras: UFLA, 729p., 2006.

NANNIPIERI, P.; ASCHER, J.; CECCHERINI, M. T.; LANDI, L.; PIETRAMELLARA, G.; RENELLA, G. Microbial diversity and soil functions. **European Journal Soil Science**, Oxford, v.54, n.4, p.655-670, 2003.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; MACEDO, R. L. G.; MOREIRA, F. M. de S., D'ANDRÉA, A. F. Indicadores Biológicos da Qualidade do Solo em Sistemas Agrossilvopastoril no Noroeste do Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n1, p.105-112, 2009.

PAUL, E. A. **Soil microbiology, ecology, and biochemistry**. Academic Press, Burlington, 3 ed. 532p, 2007

PIAO, H. C.; HONG, Y. T.; YUAN, Z. Y. Seasonal changes of microbial biomass carbon related to climatic factors in soil from Karst areas of southwest China. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.30, n.4, p.294-297, 2000.

PÔRTO, M. L.; ALVES, J. do C.; DINIZ, A. A.; SOUZA, A. P de; SANTOS, D. Indicadores biológicos de qualidade do solo em diferentes sistemas de uso no brejo paraibano. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.4, p.1011-1017, 2009.

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

REIN, T. A.; DUXBURY, J. M. Modeling the soil organic carbon, texture and mineralogy relations in the profile of oxisols from the Brazilian Cerrado. In: SIMPÓSIO NACIONAL CERRADO E II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SAVANAS TROPICAIS, 9., 2008, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa Cerrados, CD ROM. 2008.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G.; SÁ, M. A. C.; FIGUEIREDO, C. C. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. (Eds). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina: Embrapa Cerrados, p.417-473, 2008.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de

agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.11-21, 2008.

SANTOS, Everaldo dos. **Carbono, nitrogênio e relação C/N em Gleissolo e cambissolo sob diferentes tipologias vegetais na área de ocorrência da floresta ombrófila densa, Antonina – PR**. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SAS Institute, **User's guide**. Versão 9.1.3, versão para Windows. Cary, NC, USA, 2008.

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 Campo das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.5, p.1585-1592, 2010.

SIMÕES, S. M. O.; ZILLI, J. E.; COSTA, M. C. G.; TONINI, H.; BALIEIRO, F. de C. Carbono orgânico e biomassa microbiana do solo em plantios de *Acacia mangium* no Cerrado de Roraima. **Acta Amazonica**. v.40, n.1, p.23-30, 2010.

SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. de S.; GRISI, B. M.; ARAÚJO, R. S. **Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Brasília, DF: EMBRAPA - SPI, 142p., 1994.

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**. Victoria, v.30, n.2, p.195-207, 1992.

STEVENSON, F. J.; COLE, M. A. **Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. 2 ed. New York: J. Wiley, 427p., 1999.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2. ed. New York: Wiley, 1994.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores de qualidade dos solos. In: ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F. de; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (ED.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade brasileira de ciência do solo, v.2, p.195-276, 2002.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C. JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**. Oxford, v.19, n.6, p. 703-707, 1987.

WARDLE, D. A. Metodologia para a quantificação da biomassa microbiana do solo. In: HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R. S. **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Embrapa, Brasília, DF. 543, 1994.

4. CAPÍTULO 2: VARIAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE UM SOLO SOB MACAUBEIRAS NATIVAS NO CERRADO

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito da variação espacial em atributos microbiológicos, químicos e da densidade do solo, em três profundidades e a diferentes distâncias do estipe de macaubeiras nativas no Cerrado. Após a seleção de dez macaubeiras da mesma área, as amostras de solo foram coletadas a 50, 150 e 250 centímetros de distância do estipe das palmeiras, durante a época chuvosa. Foram coletadas dez subamostras para formar uma amostra composta para cada distância, nas profundidades de 0 a 10; 10 a 20 e 20 a 30 centímetros. As variáveis analisadas foram: carbono microbiano, respiração basal, quocientes metabólico e microbiano, matéria orgânica, nitrogênio total e relação C:N, estoques de carbono e nitrogênio e densidade do solo.

O Cmic, RB, qCO₂ e a MOS variam com o distanciamento horizontal em relação ao estipe de macaubeiras no Cerrado. O qMic, o NT e a relação C:N não variam espacialmente em sentido horizontal em relação ao estipe de macaubeiras. Os atributos avaliados tendem a reduzir seus valores no perfil do solo. Os atributos avaliados apresentaram maior amplitude de variação em sentido vertical (profundidade) que em sentido horizontal (distância do estipe). Os estoques totais de carbono e nitrogênio não variam espacialmente até 250 cm do estipe de macaubeiras. A densidade do solo é alterada tanto em função da variação horizontal quanto vertical.

Termos de indexação: Qualidade do solo. Estoques de C e N. *Acrocomia aculeata*. Indicadores microbiológicos.

SPATIAL VARIATION BY THE SOIL ATTRIBUTES UNDER NATIVE MACAUBA PALMS, IN THE CERRADO

ABSTRACT: The aim of this work was to study the effect of spatial variations by the microbiological and chemical attributes and soil bulk density in three different depths and distances from the stem of native macauba palms in the Cerrado. This observational study took place in Santa Fé Agropecuaria farm, in the region of Planaltina de Goiás, State of Goiás. Ten trees were selected from a native forest containing macauba palms. Soil samples were taken at depths of 0 - 10 cm; 10 -20 cm and 20 - 30 cm, from a horizontal imaginary line, drawn from the macauba's palm trunk. Soil samples were taken from a 50, 150 and 250 cm distance from the trunk. The mixed model was used in order to evaluate the observational study. The observational means were submitted to testing to evaluate if their values followed a normal distribution and to test homogeneity of variance. Subsequently, data were submitted to the F-test and the means were compared using the t-test. The Mic-C, BR, qCO₂ and SOM vary with horizontal distance in relation to the stem of the macauba palms. The qMic, TN and C:N ratio did not vary spatially horizontally in relation to the stem of the palms. The attributes evaluated tend to reduce their values in the soil profile. The

attributes evaluated had greater range of variation in the vertical (depth) than in horizontal direction (away from the stem). The total stocks of carbon and nitrogen did not vary spatially up to 250 cm from the stem of the palms. Soil bulk density changes as a function of both horizontal and vertical variation.

KEY-WORDS: Soil quality. C and N stocks. *Acrocomia aculeata*. Microbiological indicators.

4.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, há um impasse quanto à sustentabilidade do setor produtivo de biodiesel que emprega a soja como matéria-prima, já que sob o ponto de vista ecológico e social o uso dessa oleaginosa é contraditório à proposta de sustentabilidade, por se tratar de uma monocultura latifundiária (KOHLHEPP, 2010). Outra preocupação é com relação à crise mundial de alimentos que pode se agravar pelo deslocamento das áreas tradicionalmente utilizadas para o cultivo de alimentos para a produção de insumos destinados à indústria de biocombustíveis (SUAREZ et al., 2009).

O plantio de macaúba (*Acrocomia aculeata*), palmeira tipicamente brasileira e nativa de florestas tropicais, possibilita a adoção de um modelo energético sustentável, pois essa espécie não tem presença significativa como opção na alimentação humana e, além de não competir por recursos naturais nos sistemas de produção de alimentos, é adaptada à regiões com restrições hídricas (MARISOLA FILHO, 2009).

São escassos os trabalhos que envolvem os atributos do solo, seu manejo e os prováveis impactos do cultivo comercial de macaubeiras na sustentabilidade agrícola. Além disso, a exploração de maciços naturais e o plantio de espécies em áreas com pastagens degradadas para fins de produção de óleo vegetal para o setor de biocombustíveis ainda são incipientes no Brasil.

Doran e Parkin (1994) conceituam qualidade do solo (QS) como a capacidade desse recurso em exercer várias funções dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema visando à sustentação da produtividade biológica, manutenção ou melhoria da qualidade ambiental contribuindo para a saúde das plantas, animais e humana. Portanto, a qualidade desse recurso ambiental está relacionada com a manutenção e/ou melhoria de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, as quais sofrem alterações com o tipo de manejo e uso da terra que podem ser mensuradas por meio de indicadores sensíveis a modificações nas funções do solo (BARETTA et al., 2010).

Nos ecossistemas florestais tropicais a qualidade do solo tem estreita relação com a manutenção da diversidade acima e abaixo do solo, o que torna as florestas nativas insubstituíveis na preservação da biodiversidade tropical (GIBSON et al., 2011). O estudo sobre qualidade do solo tem enfatizado a necessidade de seu uso não apenas como um componente crítico da biosfera terrestre para a produção de alimento, madeira, combustível e fibras, mas também com ênfase à manutenção da biodiversidade e da qualidade ambiental (KASCHUK et al., 2010).

A biomassa microbiana é o compartimento da matéria orgânica do solo diretamente influenciado por fatores bióticos e abióticos, de tal forma que respostas a mudanças nos sistemas de uso e manejo do solo podem ser detectáveis mais rapidamente pela biomassa microbiana e seus metabólitos que as alterações nos teores de C do solo, principalmente devido ao tempo de ciclagem da matéria orgânica (GAMA- RODRIGUES et al., 2005).

Estimativas da biomassa microbiana têm sido usadas em estudos do fluxo de C e N, ciclagem de nutrientes e produtividade das plantas em diferentes ecossistemas terrestres, possibilitando ainda a associação da quantidade de nutrientes imobilizados e a atividade da biomassa microbiana com a fertilidade e o potencial de produtividade do solo (GAMA-RODRIGUES; GAMA RODRIGUES, 2008).

A importância ecológica da biomassa microbiana está relacionada com o seu potencial em suprir nutrientes e possibilidade de indicar mudanças rápidas no solo devido a interferências no sistema (TÓTOLA; CHAER, 2002). As práticas de manejo inadequadas podem levar ao rápido declínio do carbono, colaborando para o aumento das emissões de gás carbônico (CO₂) (LAL, 2005).

Além do C da biomassa, o quociente microbiano (qMIC) é um índice bastante utilizado para fornecer indicações sobre a dinâmica da matéria orgânica, expressando a eficiência da biomassa microbiana em utilizar o carbono orgânico do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A decomposição dos resíduos orgânicos no solo de ecossistemas florestais, realizada por microrganismos heterotróficos aeróbios e anaeróbios, pode ser medida por meio da quantificação do C-CO₂ liberado durante o processo respiratório, o qual também é conhecido como carbono prontamente mineralizável e reflete a atividade da microbiota do solo (BASTIDA et al., 2008). A determinação do C-CO₂ é um indicador do processo de mineralização e fluxo de energia em solos de ecossistemas naturais e agrícolas (BARETTA et al., 2010).

O quociente metabólico (qCO_2) indica a eficiência da biomassa microbiana em utilizar o C disponível para biossíntese, além de ser indicador sensível para estimar a atividade biológica e a qualidade do substrato (SAVIOZZI et al., 2002), e de modo geral, valores elevados de qCO_2 representam ecossistemas que sofreram distúrbios em relação a sistemas mais estáveis (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007).

O objetivo do trabalho foi estudar o efeito da variação espacial em atributos microbiológicos, químicos e da densidade do solo, em três profundidades e a diferentes distâncias do estipe de macaubeiras nativas no Cerrado.

4.2.MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo e amostragem

O estudo observacional foi realizado na região de Planaltina de Goiás, na Fazenda Agropecuária Santa Fé (15°20'35'' S e 47°34'34'' W), e altitude de 1017 metros), Goiás, Brasil. É um maciço de macaubeiras nativas de ocorrência em formação savânica do bioma Cerrado, com vegetação do tipo palmeiral e subtipo macaubal, próxima à mata de galeria não inundável associada à pastagem. O clima predominante corresponde ao tropical estacional de savana do tipo Aw, conforme classificação de Köppen, com temperatura média anual entre 18 °C e 28,5 °C. A precipitação pluvial média anual é de 1.400 milímetros, concentrada entre os meses de outubro a março. A região apresenta duas estações bem definidas: estação seca e fria durante o inverno e estação chuvosa e quente durante o verão.

O estudo foi realizado em um Gleissolo, textura média, fase mata de galeria não inundável em relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2006). As propriedades físico-químicas do solo na camada 0 a 20 cm foram: argila ($g\ kg^{-1}$) = 327; silte ($g\ kg^{-1}$) = 250; areia ($g\ kg^{-1}$) = 423; pH (H_2O) = 4,8; M.O. ($g\ kg^{-1}$) = 32,3; P ($mg\ dm^{-3}$) = 6,7; K^+ ($mg\ dm^{-3}$) = 89; Ca^{2+} ($cmol_c\ dm^{-3}$) = 2,8; Mg^{2+} ($cmol_c\ dm^{-3}$) = 1,5; H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$) = 6,1; Al^{3+} ($cmol_c\ dm^{-3}$) = 0,3.

Na área com macaubeiras foram selecionadas, ao acaso dentro da mata, dez árvores, vigorosas com aproximadamente 10 metros de altura; isoladas em um raio de três metros da possível interferência de raízes de outras árvores e arbustos. As amostras de solo foram coletadas a 50, 150 e 250 centímetros de distância do estipe das palmeiras. Uma linha horizontal, imaginária, foi traçada a partir da base do estipe das macaubeiras e sobre ela foram coletadas cinco subamostras à direita e cinco à esquerda,

perpendicularmente a essa linha, totalizando dez subamostras para formar uma amostra composta, contendo aproximadamente 800 gramas de solo, para cada distância.

Foram coletadas amostras nas profundidades de 0 a 10; 10 a 20 e 20 a 30 centímetros, durante o período chuvoso (março de 2010), após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e transportadas em caixa de isopor com gelo até o Laboratório de Microbiologia e Bioquímica do Solo da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília (FAV/UnB-DF). Em seguida, uma porção de solo (aproximadamente 300 gramas) de cada amostra foi separada, acondicionada em saco plástico identificado e mantida sob refrigeração a ± 4 °C até o momento das análises biológicas. A outra fração (500 gramas) destinada às análises químicas foi seca ao ar e tamisada em peneira com malha de abertura de dois milímetros para formar a terra fina seca ao ar (TFSA) que foi armazenada em sacos plásticos à temperatura ambiente até o momento das análises químicas.

Foram coletadas amostras indeformadas para a determinação da densidade do solo (D_s), em cada distância e nas três profundidades no período chuvoso.

Métodos Analíticos

Determinação da biomassa microbiana do solo: A biomassa microbiana do solo (BMS) foi estimada pelo método de clorofórmio-fumigação-extração (CFE), proposto por Vance et al. (1987). O carbono microbiano foi obtido pela diferença entre o carbono extraído das amostras fumigas e o das amostras não fumigadas multiplicadas pelo fator de conversão ($K_{EC} = 0,38$), conforme Wardle (1994).

Avaliação da atividade microbiana do solo: A atividade microbiológica foi avaliada pela respiração basal do solo, pelo método de quantificação do dióxido de carbono (C-CO₂) desprendido das amostras de solo não fumigadas em um período de sete dias (ALEF; NANNIPIERI, 1995).

Cálculo do quociente metabólico (qCO₂) e microbiano: O quociente metabólico (qCO₂) é a taxa de respiração específica da biomassa microbiana e foi calculado pela divisão da respiração basal (C-CO₂) pelo carbono microbiano (C_{mic}), (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

A partir dos resultados do carbono microbiano (C_{mic}) e do carbono orgânico total (C_{org}), foi calculada a relação entre o carbono microbiano e orgânico (C_{mic}:C_{org}), definida como quociente microbiano (q_{Mic}), expressa como o percentual de carbono microbiano em relação ao carbono orgânico total do solo. Essa relação

indica a eficiência da conversão do carbono orgânico em carbono microbiano (SPARLING, 1992).

Determinação da matéria orgânica do solo (MOS) e carbono orgânico total:

A matéria orgânica do solo (MOS) foi determinada a partir do teor de carbono orgânico total do solo quantificado por dicromatometria. Para o cálculo da matéria orgânica considerou-se que, o acúmulo de C na matéria orgânica humificada do solo é em torno de 58 %. O teor de carbono orgânico total do solo (Corg) foi determinado conforme o manual de análises de solo (EMBRAPA, 1997).

Determinação do nitrogênio total (NT) e cálculo da relação C:N: O nitrogênio total no solo (NT) foi determinado de acordo com Bremner e Mulvaney (1982). A relação C:N é utilizada como indicativo da qualidade da matéria orgânica (STEVENSON; COLE, 1999), e foi calculada pela relação entre o carbono orgânico total (Corg) e o nitrogênio total (NT).

Determinação dos estoques de carbono e nitrogênio no solo: Os estoques de C e N foram obtidos pela multiplicação dos teores de C e N (g kg^{-1}) pela densidade do solo (g cm^{-3}) e espessura da camada (cm) divididos por 10 para conversão em hectare (t ha^{-1}) (VELDKAMP, 1994).

Determinação da densidade do solo (Ds):

A densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico (Kopeck). Amostras indeformadas foram retiradas com o auxílio do amostrador tipo Uhland, nas profundidades de 0 – 10 cm; 10 – 20 cm; 20 – 30 cm. A densidade foi obtida pela razão entre a massa de terra seca (ms) e o volume total do solo (vt), $D_s (\text{g cm}^{-3}) = \text{ms}/\text{vt}$ (BLAKE; HARTGE, 1986).

Determinação da massa seca da serapilheira (Ms): A serapilheira exerce funções no equilíbrio e dinâmica dos ecossistemas, corresponde à camada mais superficial do solo em ambientes florestais, composta por folhas, ramos, órgãos reprodutivos e detritos (COSTA et al., 2010). Sua produção controla diretamente a quantidade de nutrientes que retorna ao solo e seu acúmulo se relaciona com a atividade decompositora dos microrganismos e com o grau de perturbação dos ecossistemas (FERNANDES et al., 2006).

Para a coleta da serapilheira a cada distância do estipe das macaubeiras foi utilizado um gabarito de $0,125 \text{ m}^2$. O material coletado foi pesado e seco em estufa a 65°C até massa constante e o valor foi convertido em hectare.

Análises Estatísticas

Para a análise estatística dos dados foi utilizado o seguinte modelo misto descrito em Littel et al. (1996).

$$y_{ijk} = \mu + A_i + P_j + (AP)_{ij} + H_k + (PH)_{jk} + A_i H_k (P_j) + \varepsilon_{ijk}$$

Onde: μ : constante inerente às observações

A_i : efeito da árvore i ;

P_j : efeito da profundidade j ;

$(AP)_{ij}$: efeito da interação árvore * profundidade;

H_k : efeito da distância horizontal k ;

$(PH)_{jk}$: efeito da interação profundidade * distância horizontal;

$A_i H_k (P_j)$: efeito da interação árvore * distância * profundidade, e

ε_{ijk} : erro aleatório.

O efeito de árvore é aleatório e os demais são fixos.

Por se tratar de um estudo observacional e não de um experimento, não se conhece a estrutura das variâncias e covariâncias dos dados e por isso foi conduzido um estudo estatístico para se indicar a melhor estrutura. Além disso, as médias das observações de carbono microbiano, respiração basal, quocientes metabólico e microbiano, matéria orgânica, nitrogênio total e relação C:N, estoques de carbono, nitrogênio, densidade do solo e massa seca da serapilheira foram submetidas a testes para verificar se seguiam a distribuição normal, e para verificar a homogeneidade de variâncias. As técnicas para os tratamentos das variáveis observadas estão descritas em Littel et al. (1996). O método de análise foi o de máxima verossimilhança restrita, via procedimento PROC MIXED do software SAS versão 9.1 (SAS, 2008) e as médias foram comparadas pelo teste t ($p < 0,05$).

Optou-se por esse modelo porque ele pode representar o que está ocorrendo com as variáveis observadas na natureza. Para a avaliação do estudo observacional as árvores foram consideradas como os blocos (blocos casualizados). Os dados foram coletados em três profundidades e a diferentes distâncias em relação ao estipe das palmeiras, assim foi possível estudar o comportamento dos atributos do solo em relação ao efeito espacial. No sentido vertical observou-se o efeito da profundidade e no sentido horizontal o efeito da distância em relação ao estipe.

4.3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

O carbono microbiano (Cmic), a respiração basal (RB), o quociente metabólico (qCO₂) e a matéria orgânica (MOS) foram influenciados pelo distanciamento (50, 150 e 250 cm) em relação à base do estipe das macaubeiras (Tabela 1). Todos os atributos avaliados sofreram efeito da profundidade de coleta (Tabela 1). Houve interação entre distância e profundidade para o carbono microbiano, quociente microbiano e nitrogênio total (Tabelas 1 e 2). A respiração basal, o quociente metabólico e a matéria orgânica foram afetados pela distância e profundidade e não foi observada interação entre os tratamentos (Tabelas 1 e 3). A relação C:N foi influenciada apenas em profundidade (Tabelas 1 e 3).

TABELA 1 - Valores de F da análise de variância para carbono microbiano (Cmic); respiração basal (RB); quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic); matéria orgânica (MOS), nitrogênio total (NT) e relação C:N, do solo sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas.

	Cmic	RB	qCO ₂	qMic	MOS	NT	C:N
⁽¹⁾ Distância	5,1 ^{**}	25,36 ^{****}	4,44 [*]	2,53 ^{ns}	5,05 [*]	3,29 ^{ns}	1,59 ^{ns}
Profundidade	28,11 ^{****}	144,63 ^{****}	47,14 ^{****}	27,56 ^{****}	195,89 ^{****}	84,76 ^{****}	81,28 ^{****}
Dist*prof	2,71 [*]	1,67 ^{ns}	1,96 ^{ns}	3,56 [*]	0,96 ^{ns}	5,09 ^{**}	1,97 ^{ns}

⁽¹⁾Efeitos fixos (distâncias a 50, 150 e 250 cm em relação ao estipe das macaubeiras; profundidades 0 a 10; 10 a 20 e 20 a 30 cm, e interação entre distância e profundidade).

Valores seguidos por: (****), (***), (**), e (*) mostraram efeitos, a 0,01 ($p < 0,0001$); 0,1 ($p < 0,001$); 1 ($p < 0,01$); e a 5% ($p < 0,05$), respectivamente; e (ns) não significativo ao nível de 5% de probabilidade para o teste F.

TABELA 2 - Carbono microbiano (Cmic), quociente microbiano (qMic) e nitrogênio total (NT) do solo sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas.

⁽¹⁾ Cmic			
	50	150	250
0 a 10	⁽²⁾ 456,71aA	359,43aB	374,13aB
10 a 20	380,03bA	331,25aAB	288,51bBC
20 a 30	254,81cA	262,42bA	274,88bcA
qMic			
	50	150	250
0 a 10	1,33cA	1,16cA	1,25bcA
10 a 20	1,60bcA	1,70bA	1,37bA
20 a 30	1,72abB	2,50aA	1,95aB
NT			
	50	150	250
0 a 10	2,36aA	2,00aB	1,93aBC
10 a 20	1,91bA	1,85aA	1,87aA
20 a 30	1,51cA	1,27bB	1,56bA

⁽¹⁾Unidades das variáveis microbiológicas - (Cmic = (mg C kg⁻¹); qMic = (%); nitrogênio total = (g kg⁻¹).

⁽²⁾Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas (comparação das profundidades) e maiúsculas nas linhas (comparação das distâncias), não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

TABELA 3 – Comparação dos efeitos simples sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas para a respiração basal, quociente metabólico, matéria orgânica e relação C:N do solo.

Profundidade (cm)	⁽¹⁾ RB	qCO ₂	MOS	C/N
0 a 10	⁽²⁾ 41,3a	0,11a	56,4a	15,6a
10 a 20	33,4b	0,10a	37,4b	11,6b
20 a 30	13,8c	0,054b	23,6c	9,4c
Distância (cm)				
50	⁽²⁾ 36,2a	0,098ab	43,26a	12,6a
150	27,6b	0,087bc	35,67b	11,7a
250	24,8bc	0,080c	38,61ab	12,3a

⁽¹⁾Unidades das variáveis microbiológicas - RB = (mg C-CO₂ kg⁻¹ d⁻¹); qCO₂ = (mg C-CO₂ mg Cmic⁻¹ d⁻¹); matéria orgânica = (g kg⁻¹) e relação C:N = (%).

⁽²⁾Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste t.

Em geral, os valores de Cmic das camadas superficiais para as mais profundas (20 a 30 cm) foram reduzidos.

Verifica-se uma estratificação do Cmic em profundidade. Este comportamento é mais expressivo nas proximidades da árvore (50 cm) e vai diminuindo com o aumento da distância.

Na distância de 50 cm do estipe das macaubeiras, o maior valor foi obtido na camada de 0 a 10 cm (456,71 mg C kg solo⁻¹) e houve uma redução de 17 %; 33 % e 44 %, respectivamente ao, se comparar a diferença entre as camadas 0 a 10 cm (456,71 mg C kg⁻¹) com a de 10 a 20 cm (380,03 mg C kg⁻¹); camada 10 a 20 cm (380,03 mg C kg⁻¹) com a de 20 a 30 cm (254,81 mg C kg⁻¹), e a camada 0 a 10 cm (456,71 mg C kg⁻¹) com a de 20 a 30 cm (254,81 mg C kg⁻¹) (Tabela 2).

Para a distância de 150 cm, o Cmic apresentou menores valores na camada de 20 a 30 cm (262,42 mg C kg⁻¹) e para a distância de 250 cm, os maiores valores foram obtidos na camada de 0 a 10 cm (374,13 mg C kg⁻¹) e não houve diferença significativa no Cmic entre as camadas de 10 a 20 cm, e 20 a 30 cm.

Para as distâncias a 150 cm e a 250 cm, comparando-se a camada de 0 a 10 cm de profundidade com a de 20 a 30 cm verificou-se uma redução de 27 % para ambas as distâncias. A redução de Cmic em profundidade é corroborada por Fall et al. (2012); Eilers et al. (2012) e Leite et al. (2010). A presença de maiores teores de Cmic nos primeiros 10 cm, pode ser devido ao aumento da matéria orgânica do solo que proporciona incremento na atividade e na quantidade da biomassa microbiana, uma vez que o carbono é fonte de energia e nutrientes para os microrganismos (BRUSSAARD et al., 2007; COLODORO et al., 2007). Nesse sentido, a alta atividade microbiana é uma

característica desejável, uma vez que pode significar rápida transformação de resíduos orgânicos em nutrientes para as plantas (TU et al., 2006).

Fall et al. (2012) relataram que a redução na biomassa microbiana do solo em relação à profundidade pode ser atribuída à quantidade de nutrientes como carbono e nitrogênio, e esse comportamento microbiano pode estar relacionado com a biomassa radicular, visto que na camada 0-25 cm ocorre maior densidade de raízes de *Acacia Senegal*. Além disso, na região rizosférica, a diversidade e o número de microrganismos são determinados pela composição e concentração de exsudados radiculares, porque estes são fonte de nutrientes para os microrganismos (MARSCHNER et al., 2004).

Eilers et al. (2012) relatam que a biomassa microbiana decresce exponencialmente com a profundidade e esse comportamento pode estar mais relacionado com a qualidade do carbono do que com sua quantidade (RUMPEL; KOGEL-KNABNER, 2011). A comunidade microbiana na superfície é mais heterogênea em relação aos microrganismos das camadas intermediária e isto se deve à variabilidade na camada superficial e à variabilidade de fatores edáficos como pH e concentração de carbono orgânico; e condições ambientais e microambientais, além de diferentes tipos de vegetações na superfície onde a densidade de raízes e entrada de serapilheira é maior. Já nas camadas intermediárias os fatores edáficos, a temperatura e a umidade são mais uniformes, portanto, mesmo quando a concentração de carbono em subsuperfície é mais alta não promove maior biomassa microbiana em função da qualidade do C (EILERS et al., 2012).

Os valores obtidos para o C_{mic} nesse estudo variaram entre 456,71 mg C kg⁻¹ e 254,81 mg C kg⁻¹, respectivamente, nas camadas 0 a 10 cm, e 20 a 30 cm para a distância a 50 cm do estipe (Tabela 2). Observações realizadas por Leite et al. (2010) corroboram os valores obtidos nesse estudo, pois esses autores obtiveram para área de macaubeiras preservadas na região central do Maranhão, teores de C_{mic} de 496 mg C kg⁻¹ na camada 0 a 5 cm; e 50,4 mg C kg⁻¹ na camada 20 a 40 cm. Além disso, há relatos de teores de C_{mic} na camada de 0-5 cm em solo sob vegetação nativa sem histórico de interferência humana e sob condições edafoclimáticas variadas, da ordem de 1.495,6 mg C kg solo⁻¹ (NEVES et al., 2009); 378 mg C kg⁻¹ (LEITE et al., 2010) e 316,04 mg C kg⁻¹ Pragana et al. (2012) no Cerrado Piauiense.

A amplitude de variação do carbono microbiano em relação à distância horizontal do estipe de macaubeira foi menor ao se comparar a variação deste atributo no perfil do solo, pois na camada de 0 a 10 cm, o C_{mic} foi maior na distância de 50 cm

e semelhante nas distâncias de 150 e 250 cm. Na camada de 10 a 20 cm, o C_{mic} diferiu estatisticamente somente entre a distância de 50 e 250 cm. Para a camada de 20 a 30 não houve diferença dos valores médios de C_{mic} conforme se distanciou do estipe (Tabela 2). O resultado desse estudo sugere que nas camadas mais profundas do solo, mesmo a 250 cm de distância do estipe da macaúba a biomassa não se altera. Fall et al. (2012) verificaram uma redução na biomassa microbiana do solo em relação ao distanciamento horizontal do caule de *Acacia senegal*.

A distribuição das chuvas e a umidade do solo são fatores de regulação da biomassa microbiana (GAMA-RODRIGUES et al., 2005) e foi constatado nesse estudo que os atributos microbiológicos e suas relações são mais influenciados pela profundidade do que pelo distanciamento horizontal em relação ao estipe das palmeiras.

Quando se estuda a comunidade microbiana em solos de mata ou vegetação nativa, já se espera encontrar valores relativamente maiores quando comparados a solos com outros tipos de cobertura como os solos cultivados, já que a microbiota sob sistemas sem revolvimento do solo é favorecida pela cobertura vegetal que propicia maior acúmulo de material orgânico, fornecendo maior fonte de nutrientes para seu desenvolvimento (ALVES et al., 2011). Entretanto, mesmo no cerrado nativo, onde provavelmente existia maior estabilidade na dinâmica de carbono no solo, ou seja, equilíbrio entre a entrada e a decomposição de liteira, Simões et al. (2010) encontraram teores de C_{mic} de 322,3 mg C kg⁻¹ em solo sob plantio de acácia e de 191,6 mg C kg⁻¹ sob cerrado nativo em Roraima, um maior valor de C_{mic} em sistemas cultivados contraria a tendência de comportamento microbiano em sistemas nativos *versus* cultivados e se deve, provavelmente, à ativação da biomassa microbiana decorrente do fornecimento de substrato de melhor qualidade nutricional proporcionado pela deposição de liteira das plantas de acácia. Cunha et al. (2012) relatam que o maior valor de C_{mic} em mata é reflexo de uma situação particular para a microbiota do solo nesse sistema, que é estimulada pelo fornecimento contínuo de materiais orgânicos com diferentes graus de suscetibilidade à decomposição, originados da vegetação.

Para todas as distâncias avaliadas houve um aumento do q_{Mic} em profundidade, sendo que os valores observados na camada superficial (0 a 10 cm) foram menores do que os valores da camada mais profunda (20 a 30 cm) (Tabela 2). A razão $C_{mic}:C_{org}$ variou de 1,16 % na camada superficial (0 a 10 cm) para 2,5 % na camada mais profunda (20 a 30 cm), ambos a 150 cm do estipe (Tabela 2). O aumento no q_{Mic} em profundidade observada nesse estudo contraria os resultados de Leite et al. (2010), que

encontraram para área de macaubeiras preservadas na região central do Maranhão, maior valor de qMic (2,75 %) na camada 0 a 5 cm e menor qMic (0,84 %) na camada mais profunda (20 a 40 cm). Por outro lado, uma tendência de elevação dos valores da relação Cmic:Corg em profundidade também foi relatada por Neves et al. (2009).

O qMic, que é a relação entre o Cmic e o carbono orgânico do solo, reflete quanto do C orgânico do solo está imobilizado na biomassa microbiana e mostra o potencial de reserva desse elemento no solo (CARNEIRO et al., 2009). O qMic é um indicador da qualidade da matéria orgânica do solo (TÓTOLA; CHAER, 2002). O quociente microbiano (qMic), em geral, varia de 1 a 4 % e valores inferiores a 1 % podem ser atribuídos a algum fator limitante à atividade da biomassa microbiana (JAKELAITIS et al., 2008), sendo assim, a microbiota do solo sob macaubeiras não está sob estresse, visto que em todas as camadas e distâncias os valores do quociente microbiano foram maiores que 1 %. Entretanto, D'Andrea et al. (2002) recomendam que se estabeleça um valor de referência para cada situação específica, ao se utilizar o índice qMic para retratar relações de equilíbrio, degradação ou recuperação, pois este índice é pouco extrapolável.

O qMic é utilizado para fornecer indicações sobre a dinâmica da matéria orgânica, expressando a eficiência da biomassa microbiana em utilizar o carbono orgânico do solo. Maior qMic representa maior ciclagem de nutrientes, por haver maior quantidade de microrganismos em termos de C, quando comparado ao carbono orgânico total (PRAGANA et al., 2012). Um alto quociente microbiano também pode indicar uma matéria orgânica muito ativa e sujeita a transformações (SAMPAIO et al., 2008), onde os microrganismos mineralizam a matéria orgânica e utilizam parte do carbono como fonte de energia e nutriente, transformando-o em tecido microbiano (ALMEIDA et al., 2009).

Não houve efeito das distâncias do estipe de macaúba nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm; já para a camada de 20 a 30 cm, a distância de 50 cm do estipe apresentou qMic (1,72 %), estatisticamente diferente do valor de qMic observado a 150 cm (2,50 %) que foi o maior valor observado. Não houve diferença do qMic entre as distâncias de 50 cm (1,72 %) e 250 cm (1,95 %) (Tabela 2). Silva et al. (2010) afirmam que a baixa disponibilidade ou qualidade do substrato orgânico pode ocasionar baixos valores de qMic. O grau de estabilização do carbono orgânico e o histórico de manejo da área também influenciam o qMic (NEVES et al., 2009). O qMic tende a diminuir em solos com matéria orgânica de difícil decomposição, pois sob essa condição os

microrganismos são incapazes de utilizar totalmente o Corg (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

O N total na camada 0 a 10 cm apresentou os maiores valores absolutos em todas as distâncias em relação ao estipe. Na distância de 50 cm do estipe das macaubeiras, o maior teor de N total foi obtido na camada de 0 a 10 cm ($2,36 \text{ g kg}^{-1}$) e houve uma redução em torno de 19 %, 21 % e 36 %, respectivamente ao se comparar a diferença entre as camadas 0 a 10 cm ($2,36 \text{ g kg}^{-1}$) com a 10 a 20 cm ($1,91 \text{ g kg}^{-1}$); camada 10 a 20 cm ($1,91 \text{ g kg}^{-1}$) com a de 20 a 30 cm ($1,51 \text{ g kg}^{-1}$), e a camada 0 a 10 cm ($2,36 \text{ g kg}^{-1}$) com a de 20 a 30 cm ($1,51 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 2).

Para as distâncias a 150 e a 250 cm, houve tendência de redução no teor de N total, mas os valores da camada de 10 a 20 cm foram semelhantes entre si e diferentes do valor observado para a camada de 20 a 30 cm. Portanto, a 150 cm ao se comparar a diferença entre as camadas 0 a 10 cm ($2,00 \text{ g kg}^{-1}$) e 20 a 30 cm ($1,27 \text{ g kg}^{-1}$); camada 10 a 20 cm ($1,85 \text{ g kg}^{-1}$) com a de 20 a 30 cm ($1,27 \text{ g kg}^{-1}$), a redução foi, respectivamente de 36,5 % e 31,3 %. Para a distância de 250 cm, a redução foi de 16,5 % e 19 %, ao se comparar respectivamente, as camadas 0 a 10 cm ($1,93 \text{ g kg}^{-1}$) com 20 a 30 cm ($1,56 \text{ g kg}^{-1}$); camada 10 a 20 cm ($1,87 \text{ g kg}^{-1}$) com a de 20 a 30 cm ($1,56 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 2). A redução no teor de N total em profundidade é corroborada por Eiler et al. (2012) que relataram redução exponencial do nitrogênio mineral com a profundidade e Pillon et al. (2011) também verificaram redução nos teores de nitrogênio total com a profundidade. No entanto, Fall et al. (2012) verificaram que o teor de N reduz com a profundidade e distância do tronco de árvores de *A. senegal*. Nesse estudo não se verificou a redução do teor de N total em relação ao distanciamento do estipe para todas as camadas avaliadas.

Os teores de nitrogênio no solo foram menores que o teor médio de nitrogênio ($3,8 \text{ g kg}^{-1}$) relatado em Gleissolo estudado por Santos (2007). O nitrogênio total do solo alterou-se mais em função da profundidade que da distância em mata de macaubeiras no Cerrado. Gama-Rodrigues et al. (2005) sugerem que a influência das condições ambientais na atividade microbiana e no N_{mic} e C_{mic} foi maior do que para os valores totais de N e C, aparentemente mais estáticos ao longo do ano. Sistemas onde ocorre ausência de queimadas e maior teor de argila contribuem para evitar perdas de nitrogênio por volatilização e lixiviação (MATIAS et al., 2009).

A variação horizontal do teor de N total conforme se distancia do estipe não foi tão acentuada, e para a camada de 0 a 10 cm verificou-se tendência de redução no teor

nitrogênio total no solo a 50 cm de distância do estipe, o valor de N total de 2,36 g kg⁻¹ foi estatisticamente diferente dos valores encontrados a 150 cm (2,0 g kg⁻¹) e 250 cm (1,93 g kg⁻¹), entretanto os valores correspondentes às distâncias a 150 e 250 cm foram semelhantes. Na camada 10 a 20 cm não houve diferença do N total entre as distâncias estudadas. Na camada 20 a 30 cm, houve semelhança entre o teor de N total apresentado a 50 cm (1,51 g kg⁻¹) e a 250 cm (1,56 g kg⁻¹). A 150 cm encontrou-se o menor teor de N total (1,27 g kg⁻¹) que foi diferente das distâncias de 50 cm e 250 cm (Tabela 2).

A redução no teor de nitrogênio em profundidade e distância do tronco pode ser atribuída à variação na taxa de mineralização, absorção pelas plantas e imobilização pelos microrganismos; perdas por erosão, lixiviação, escoamento superficial e desnitrificação (FALL et al., 2012). O maior valor de N junto ao tronco pode ser explicado pelo fato da mineralização de nitrogênio na rizosfera ser fortemente influenciada pela planta e seus exsudatos radiculares que consistem em compostos de carbono facilmente degradáveis (FALL et al., 2012).

Não houve interação entre a distância do estipe e a profundidade para as avaliações da respiração basal (RB), do quociente metabólico (qCO₂), da matéria orgânica (MOS) e da relação C:N (Tabela 1). Comparando-se os atributos (RB, qCO₂, MOS e C:N) entre as profundidades verificou-se que o efeito de profundidade (variação vertical) foi mais acentuado que o efeito de distância (variação horizontal) (Tabelas 1 e 3).

A comparação entre as profundidades para a respiração basal mostrou uma redução significativa com a profundidade, respectivamente, de 19 %; 58,5 % e 66,4 %, ao se comparar a diferença entre as camadas 0 a 10 cm (41,35 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) com a de 10 a 20 cm (33,44 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹); camada 10 a 20 cm (33,44 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) com a de 20 a 30 cm (13,88 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹), e a camada 0 a 10 cm (41,35 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) com a de 20 a 30 cm; (13,88 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) (Tabela 3).

A RB representa a atividade metabólica do solo e o aumento da taxa de respiração basal (C-CO₂) indica que a biomassa microbiana estaria atuando na decomposição da matéria orgânica do solo, com imobilização de nutrientes em sua biomassa e liberação de parte destes constituintes para a solução do solo (LOURENTE et al., 2011). Há poucos trabalhos sobre a distribuição espacial da atividade respiratória do solo; a maioria dos trabalhos compara diferentes sistemas de manejo com áreas nativas de cerrado (SILVA et al., 2010; NEVES et al., 2009) e há trabalhos em que se

observa maior atividade respiratória da biomassa microbiana nos sistemas com menor intensidade de manejo do solo (HUNGRIA et al., 2009; MERILES et al., 2009 e FRAZÃO et al., 2010).

A comparação do efeito do distanciamento em relação ao estipe de macaubeiras para a respiração basal mostrou que houve diferença nos valores observados para a distância de 50 cm (36,21 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) *versus* 150 cm (27,61 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) e 50 cm (36,21 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) *versus* 250 cm (24,85 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) e para o contraste 150 cm (27,61 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) *versus* 250 cm (24,85 mg C-CO₂ kg solo⁻¹ d⁻¹) os valores da respiração basal foram semelhantes (Tabela 3).

A comparação entre as profundidades para o quociente metabólico mostrou redução apenas na camada mais profunda (20 a 30 cm), a camada superficial (0 a 10 cm) e a camada intermediária (10 a 20 cm) tiveram eficiência metabólica semelhantes (Tabela 3). O quociente metabólico (qCO₂) expressa a energia necessária para a manutenção da atividade metabólica em relação à energia necessária para a síntese da própria biomassa, sendo considerado um índice metabólico para avaliar o efeito de condições de estresse sobre a atividade microbiana (ANDERSON; DOMSCH, 1993; GAMA-RODRIGUES et al., 2008).

A comparação do efeito do distanciamento em relação ao estipe de macaubeiras para o quociente metabólico mostrou que houve diferença nos valores observados para a distância de 50 cm (0,0983 mg C-CO₂ kg biomassa⁻¹ d⁻¹) *versus* 250 cm (0,080 mg C-CO₂ kg biomassa⁻¹ d⁻¹) e a quantidade de carbono oxidado por grama de carbono da biomassa microbiana por dia foi semelhante para as distâncias 50 cm (0,0983 mg C-CO₂ kg biomassa⁻¹ d⁻¹) *versus* 150 cm (0,0873 mg C-CO₂ kg biomassa⁻¹ d⁻¹), e 150 cm (0,0873 mg C-CO₂ kg biomassa⁻¹ d⁻¹) *versus* a de 250 cm (0,080 mg C-CO₂ kg biomassa⁻¹ d⁻¹) (Tabela 3). A maior atividade da microbiota, possivelmente é estimulada pela constante deposição de substratos orgânicos e grande quantidade de raízes (SILVA et al., 2010).

Sabe-se que, em termos gerais, 2/3 do C decomposto é liberado como CO₂, enquanto 1/3 é incorporado no tecido microbiano (PAUL, 2007). Entretanto, a diminuição do quociente metabólico sugere a ocorrência de uma comunidade microbiana mais eficiente na utilização de compostos orgânicos, liberando menos C na forma de CO₂ e incorporando mais C nos tecidos microbianos. Assim, alto qCO₂ pode estar associado a uma condição de estresse no ambiente, enquanto que baixo qCO₂ pode

refletir um ambiente mais estável. A diminuição nesse quociente pode ter implicações práticas na agricultura, pois se menos C é respirado, uma menor quantidade de C é liberada do solo, podendo ocorrer acúmulo de C no solo (BALOTA et al., 2004).

Os sistemas que promovam menores qCO_2 devem ser estimulados, pois nesses sistemas a biomassa microbiana está em equilíbrio, com menores perdas de dióxido de carbono (CO_2) pela respiração, e, com isso, maior é a incorporação de C à biomassa microbiana (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

Somente 15 a 30 % da biomassa microbiana do solo é catabolicamente ativa e o restante dos microrganismos do solo está na forma inativa ou latente, possuindo baixa atividade (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), portanto, recomenda-se cuidado nas interpolações da atividade metabólica da biomassa microbiana, expressa pela respiração basal e pelo quociente metabólico.

A comparação entre as profundidades para a matéria orgânica do solo mostrou uma redução significativa com a profundidade, respectivamente, de 33,5 %; 36,8 % e 58 %, ao se comparar a diferença entre as camadas 0 a 10 cm ($56,4 \text{ g kg}^{-1}$) com a de 10 a 20 cm ($37,4 \text{ g kg}^{-1}$); camada 10 a 20 cm ($37,4 \text{ g kg}^{-1}$) com a de 20 a 30 cm ($23,6 \text{ g kg}^{-1}$), e a camada 0 a 10 cm ($56,4 \text{ g kg}^{-1}$) com a de 20 a 30 cm ($23,6 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 3).

A matéria orgânica do solo (MOS) é constituída por C, H, O, N, S e P, sendo que o carbono (C) compreende cerca de 58 % da MOS (STEVENSON; COLE, 1999), portanto fatores que influenciam os teores de C no solo são compatíveis para verificar mudanças no comportamento da matéria orgânica. Autores como Cunha et al. (2012); Pôrto et al. (2009); Jakelaitis et al. (2008) e Albuquerque et al. (2005) verificaram que sistemas sem histórico de perturbação antrópica, como as matas, apresentam maior carbono orgânico do solo que os sistemas sob outras coberturas, provavelmente pelo aporte de resíduos orgânicos, não revolvimento do solo e reduzida erosão hídrica pela maior cobertura do solo pela liteira.

A comparação do efeito do distanciamento em relação ao estipe de macaubeiras para a matéria orgânica do solo mostrou que houve diferença nos valores observados apenas para a distância de 50 cm ($43,26 \text{ g kg}^{-1}$) *versus* 150 cm ($35,67 \text{ g kg}^{-1}$). Para os contrastes 50 cm ($43,26 \text{ g kg}^{-1}$) *versus* 250 cm ($38,61 \text{ g kg}^{-1}$) e 150 cm ($35,67 \text{ g kg}^{-1}$) *versus* 250 cm ($38,61 \text{ g kg}^{-1}$) os valores da matéria orgânica foram semelhantes (Tabela 3). Esses valores são confirmados por Diniz et al. (2010a) que verificaram que houve influência do distanciamento da base do estipe, nessa mesma área, no comportamento da MOS para as camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm.

Houve diminuição da relação C:N em profundidade, que variou de 15,6 na camada de 0 a 10 cm a 9,4 na camada de 20 a 30 cm (Tabela 3). Eilers et al. (2012) corroboram a redução em profundidade da relação C:N. A relação C:N é um indicador importante da decomposição da matéria orgânica do solo e fornece informação sobre os nutrientes essenciais para a atividade dos microrganismos do solo (SANTOS, 2007). Os resultados apresentados nesse estudo são compatíveis com a relação C:N (10 a 15/1) apresentada por Stevenson (1994) em estudos de solos tropicais não revolvidos. Santos (2007) em estudo de tipologias em Gleissolo relata um valor médio de 14,08 para a relação C:N na camada 0 a 5 cm. Essa classe de solo é condicionada pelo regime de saturação hídrica o qual determina um ambiente redutor pela falta ou escassez de oxigênio (EMBRAPA, 2006). Os maiores valores da relação C:N em Gleissolo parecem estar associados ao aspecto hidromórfico do solo o que dificulta a degradação do carbono, e à presença do lençol freático no perfil do solo favorecendo as perdas de N por lixiviação.

Siqueira Neto (2006), verificou aumento da relação C:N de um Latossolo, em Rio Verde (GO), em relação à profundidade nas áreas de Cerradão, pastagem, plantio convencional e plantio direto e justificou que isto ocorreu devido à redução dos teores de N nas camadas mais profundas do solo, e também pela presença de compostos orgânicos mais estáveis na matéria orgânica. O autor observou que os valores médios para a profundidade de 0-40 cm variaram de 16 a 25, e provavelmente maiores valores na relação C:N se deve ao aporte de material vegetal com elevada quantidade de lignina e celulose.

Em contraposição aos resultados mencionados acima, esta pesquisa mostrou maior relação C:N (15,6) na camada de 0 a 10 cm, e as camadas subsuperficiais tiveram valores respectivamente iguais a 11,6 e 9,4.

Não houve efeito das distâncias do estipe das macaubeiras na relação C:N do solo (Tabela 3) discordando de Diniz et al. (2010b), que em estudos sobre o efeito da distância da base do estipe na relação entre o carbono orgânico e nitrogênio total, nessa área, verificaram influência do distanciamento horizontal na relação C:N.

Estoques de Carbono, Nitrogênio e Densidade do Solo

Os estoques totais de carbono orgânico ($ET_{C_{org}}$) e nitrogênio total (ET_{NT}) não foram influenciados pelo distanciamento em relação ao estipe das macaubeiras (Tabela

4). Houve efeito espacial em relação ao distanciamento horizontal do estipe para a massa seca da serapilheira (Ms) (Tabela 4).

TABELA 4 – Estoque total de carbono orgânico (ET_{Corg}), nitrogênio total (ET_{NT}), na camada 0 a 30 cm, e massa seca da serapilheira (Ms) sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras nativas.

Variáveis (t ha ⁻¹)	Distância (cm)		
	50	150	250
Estoque total carbono orgânico (ET_{Corg})	⁽¹⁾ 91,09a	84,24a	93,48a
Estoque total nitrogênio (ET_{NT})	7,08a	7,01a	7,51a
Massa seca serapilheira (Ms)	0,60a	0,37b	0,40b

⁽¹⁾Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste t.

Nesse estudo os valores observados para o estoque de carbono, até 30 cm de profundidade, em todas as distâncias em relação ao estipe são maiores do que os resultados obtidos por Leite et al. (2010) em um Latossolo sob mata de macaubeira no Cerrado do Maranhão (54,24 t ha⁻¹), na camada 0 – 40 cm.

Resck et al. (2008) estudaram o efeito de diferentes sistemas de manejo nos estoques de carbono de três principais solos da Bacia Hidrográfica do Córrego Taquara, Distrito Federal, até a profundidade de 60 cm. Foram selecionados os seguintes solos: Latossolo Vermelho (66,5 t C ha⁻¹), Latossolo Vermelho-Amarelo (53,09 t ha⁻¹) e Neossolo Quartzarênico (38,14 t ha⁻¹), que representam as principais classes de solo sob uso antrópico no Domínio do Cerrado. Os sistemas de manejo escolhidos foram: plantio convencional (62,9 t ha⁻¹), plantio direto (67,9 t ha⁻¹), pastagem (64,0 t ha⁻¹) e Cerrado nativo (44,6 t ha⁻¹).

Além do estoque de carbono ser influenciado por diferentes sistemas de manejo e classes de solo; resultados de pesquisa mostraram que os Campos Limpos Úmidos, sob Gleissolos e Plintossolos, possuem elevado potencial para estocar C no solo, que em média possuem 183,78 t ha⁻¹ para a profundidade de 60 cm (FRANÇA, 2011).

Meirelles et al. (2006) avaliaram o estoque de carbono no solo, assim como, relacionaram a altura do lençol freático com os fluxos diurnos de CO₂ em um Campo Limpo Úmido (Brasília, DF), e até 60 cm de profundidade encontraram 241 t ha⁻¹.

Os estoques estimados até 40 cm de profundidade em Latossolos sob vegetação nativa de cerrado (64,85 t ha⁻¹); pastagem de *brachiaria* melhorada (77,07 t ha⁻¹) e pastagem de *Brachiaria* degradada (62,14 t ha⁻¹) na Bacia do Rio Araguari, localizada na porção oeste do estado de Minas Gerais, demonstram que pastagens bem formadas e

manejadas, podem acumular mais carbono no solo que a vegetação natural e contribuir com o aumento da taxa de sequestro de carbono. Entretanto, a má formação das pastagens, a falta de reposição de nutrientes no solo, o manejo inadequado, o excesso de lotação (sobrepastejo) tem levado à degradação das pastagens cultivadas comprometendo a capacidade de sequestrar carbono por esse sistema (ROSENDO; ROSA, 2012).

Os estoques de carbono até 40 cm de profundidade, em um Latossolo Vermelho distroférico típico no município de Lavras – MG, para diferentes tipos de usos e manejos do solo como mata nativa com floresta estacional semidecídua sem interferência antrópica (90,6 t ha⁻¹); eucalipto (105,28 t ha⁻¹); pinus (87,87 t ha⁻¹); pastagem não manejada (94,6 t ha⁻¹); milho no sistema de cultivo mínimo (86,57 t ha⁻¹) e milho em sistema plantio convencional (62,44 t ha⁻¹) (RANGEL; SILVA, 2007).

Em área de reflorestamento na floresta amazônica no município de Cotriguaçu em Mato Grosso, Moreira (2010) encontrou os seguintes valores de estoques de carbono até 30 cm de profundidade para pastagem (43,3 t ha⁻¹); Ipê Rosa/Caixeta (45,6 t ha⁻¹); Teca (32,4 t ha⁻¹) e Ipê Rosa/Freijó (32,6 t ha⁻¹).

Os teores de C tendem a diminuir com o cultivo do solo quando comparado à mata nativa (ASSIS et al., 2006). Além disso, os teores de C superficiais tendem a diminuir, havendo pouca alteração em profundidades maiores (FRANÇA, 2011).

As camadas superficiais do solo são mais sensíveis às variações nos teores de C, devido à ação dos microrganismos na matéria orgânica do solo. Nas camadas mais profundas o teor de C contribui de forma mais estável para o acúmulo deste elemento no solo, o que pode ser explicado pelo menor efeito dos fatores climáticos, por fatores inerentes dos resíduos, e pela menor perturbação do solo (OLIVEIRA et al., 2008).

O estoque de nitrogênio no solo, também apresentou valores semelhantes entre as distâncias do estipe da macaúba (Tabela 4).

Os teores de N, em diferentes profundidades do solo, apresentam o mesmo padrão de distribuição dos teores de C, com os maiores valores nas camadas superficiais, onde há o maior acúmulo de matéria orgânica (RANGEL et al., 2008). A relevância da inclusão do nitrogênio em estudos envolvendo a dinâmica da matéria orgânica se deve ao fato de que os compostos orgânicos representarem um importante reservatório de formas de N potencialmente disponíveis para as culturas (D'ANDREA et al., 2004).

Os valores observados para o estoque de nitrogênio total até 30 cm de profundidade, em todas as distâncias em relação ao estipe são maiores do que os resultados obtidos por Leite et al. (2010) em um Latossolo sob mata de macaubeira no Cerrado do Maranhão (6,35 t ha⁻¹), até 40 cm de profundidade.

Em relação ao N total no solo, Cardoso et al. (2010), em um Neossolo Quartzarênico órtico no Mato Grosso do Sul, não detectaram diferenças significativas nos estoques de N total promovidas pela substituição da floresta nativa por pastagem cultivada. Os valores para a vegetação nativa até 40 cm de profundidade variaram de 3,71 a 5,25 t ha⁻¹; e nas pastagens nativa e cultivada variaram de 3,74 a 3,93 t ha⁻¹. Provavelmente, os resíduos vegetais depositados no solo sob os ecossistemas naturais foram constituídos principalmente por substratos orgânicos de decomposição rápida, o que não contribuiu para incrementos nos estoques de N total no solo (PULRONIK, et al., 2009).

Os estoques de nitrogênio até 40 cm de profundidade, em um Latossolo Vermelho distroférico típico, no município de Lavras – MG, para diferentes tipos de uso e manejo do solo mata nativa com floresta estacional semidecídua sem interferência antrópica (7,98 t ha⁻¹); eucalipto (8,89 t ha⁻¹); pinus (8,16 t ha⁻¹); pastagem não manejada (8,6 t ha⁻¹); milho no sistema de cultivo mínimo (7,66 t ha⁻¹) e milho em sistema plantio Convencional (7,80 t ha⁻¹) (RANGEL; SILVA, 2007).

As amplitudes de variação para os resultados encontrados tanto para os estoques de carbono quanto para de nitrogênio em literatura para as diferentes fitofisionomias e sistemas de manejo, provavelmente, estão associadas à grande variabilidade nas condições experimentais, como clima, tipo e preparo do solo e manejo e idades das florestas, que afetam o crescimento das árvores e a decomposição dos resíduos depositados no solo (ZINN et al., 2002).

Houve interação entre distância e profundidade para a densidade do solo (Ds) (Tabelas 5).

TABELA 5 - Valores de F da análise de variância para densidade do solo (g cm⁻³), sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas.

	Densidade do solo (Ds)
⁽¹⁾ Distância	19,86 ^{****}
Profundidade	41,88 ^{****}
Dist*prof	5,54 ^{***}

⁽¹⁾Efeitos fixos (distâncias a 50, 150 e 250 cm em relação ao estipe das macaubeiras; profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm, e interação entre distância e profundidade).

Valores seguidos por: ^(****), ^(***), ^(**), e ^(*) mostraram efeitos, a 0,01 ($p<0,0001$); 0,1 ($p<0,001$); 1 ($p<0,01$); e a 5 % ($p<0,05$), respectivamente; e (ns) não significativo ao nível de 5 % de probabilidade para o teste F.

A densidade do solo na camada 0 a 10 cm a 50 cm de distância do estipe apresentou o menor valor absoluto ($1,06 \text{ g cm}^{-3}$). No geral, houve uma tendência de aumento da densidade do solo com a profundidade. A densidade do solo não variou estatisticamente, para todas as distâncias (50, 150 e 250 cm) avaliadas na camada de 20 a 30 cm (Tabela 6 e Figura 1).

A 50 cm do estipe verificou-se que a densidade do solo na camada 0 a 10 cm ($1,06 \text{ g cm}^{-3}$) diferiu das camadas mais profundas 10 a 20 cm ($1,30 \text{ g cm}^{-3}$) e 20 a 30 cm ($1,35 \text{ g cm}^{-3}$). A 150 cm do estipe a densidade do solo na camada 0 a 10 cm foi diferente da camada 20 a 30, e não houve diferença entre os valores das camadas 10 a 20 e 20 a 30 cm; e 0 a 10 e 10 a 20 cm. A 250 cm do estipe a densidade do solo não se diferenciou nas camadas estudadas (Tabela 6).

TABELA 6 – Densidade do solo (Ds) (g cm^{-3}) sob diferentes distâncias do estipe de macaubeiras e nas três profundidades estudadas.

Camadas	Distâncias		
	50	150	250
0 a 10	⁽¹⁾ 1,06bB	1,31bA	1,35aA
10 a 20	1,30aB	1,41abAB	1,44aA
20 a 30	1,35aA	1,43aA	1,44aA

⁽¹⁾Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas (comparação das profundidades) e maiúsculas nas linhas (comparação das distâncias), não diferem entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Tukey.

Os dados de densidade observados nesse estudo ($1,06$ a $1,35 \text{ g cm}^{-3}$) na camada 0 a 10 cm, e ($1,30$ a $1,44 \text{ g cm}^{-3}$) na camada de 10 a 20 cm, e ($1,35$ a $1,44 \text{ g cm}^{-3}$) na camada 20 a 30 cm, estão dentro da variação relatada por Paulleto et al. (2005) para Gleissolos, que encontraram, respectivamente, para a camada 0 a 10 cm, valores de Ds entre $1,45$ e $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, e para a camada 10 a 20 cm, Ds de $1,52$ a $1,61 \text{ g cm}^{-3}$. Nogueira et al. (2004) também corroboram os resultados desse estudo, visto que também encontraram, em Gleissolo, Ds de $1,07$ a $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ (camada 0 a 10 cm); Ds de $1,16$ a $1,32 \text{ g cm}^{-3}$ (camada 10 a 20 cm) e Ds de $1,29$ a $1,33 \text{ g cm}^{-3}$ (camada 20 a 30 cm). Os valores de densidade menores em áreas sob mata nativa, na camada superficial, foram confirmados por Viana et al. (2011) e Wendling et al. (2012). Em áreas de floresta natural as camadas superficiais apresentam densidades próximas de $1,0 \text{ g cm}^{-3}$, entretanto há relatos de valores acima de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ (REICHERT et al., 2007).

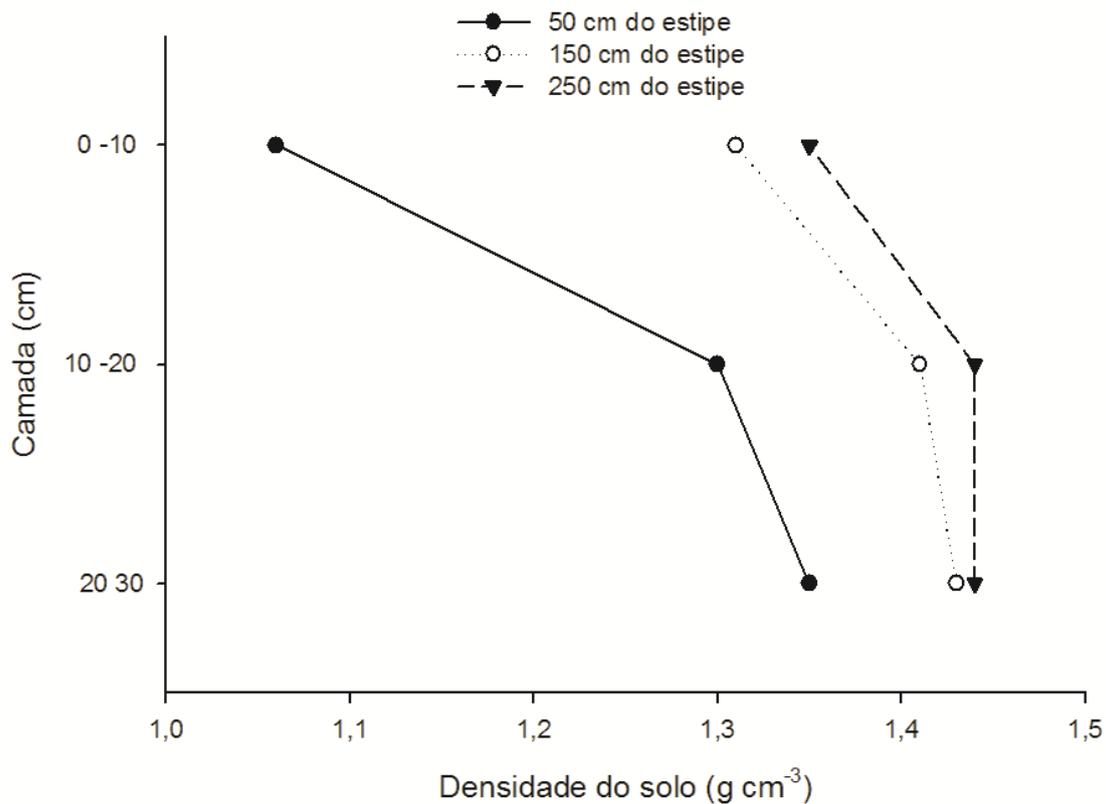


FIGURA 1 – Densidade do solo em profundidade a três distâncias do estipe de macaubeiras.

Pauletto et al. (2005) verificaram que houve aumento significativo da densidade do solo em profundidade e afirmam que o comportamento desse atributo, provavelmente, não está relacionado aos tratamentos, entretanto se relaciona a características intrínsecas do próprio solo, pois no tratamento testemunha também houve aumento da densidade na camada superficial (10 a 20 cm). NOGUEIRA et al. (2004) confirmam a tendência de aumento da densidade do solo nas camadas mais profundas. Melo (2003) verificou a tendência de elevação da densidade do solo com a profundidade.

Santos (2007) avaliando a Ds sob diferentes tipologias de cobertura vegetal (pastagem, herbácea-arbustiva, arbórea e florestal média), em diferentes profundidades em Gleissolo verificou que a densidade é menor na camada superficial (0 a 5 cm) e aumenta gradativamente com a profundidade e isso se deve, em parte, pela diminuição do teor de matéria orgânica.

A maior densidade do solo encontrada em profundidade, também pode ser explicada pelas pressões exercidas das camadas superiores sobre as subjacentes, que provocam a compactação, reduzindo a sua porosidade, bem como a movimentação de material de menor granulometria dos horizontes superiores para os inferiores (iluviação) que também concorre para a redução do espaço poroso e aumento da densidade (PAULETTO et al., 2005).

Na camada de 0 a 10 cm houve diferença da densidade a 50 vs 150 e 50 vs 250; e a densidade a 150 vs 250 cm não diferiram entre si. Na camada 10 a 20 cm apenas a densidade a 50 cm de distância diferiu do valor encontrado a 250 cm; e a densidade a 50 vs 150 cm foram semelhantes, assim como a densidade observada a 150 vs 250 cm de distância (Tabela 6).

A menor densidade do solo ($1,06 \text{ g cm}^{-3}$, tabela 6) verificada na camada superficial a 50 cm do estipe, pode ser devido ao maior teor de matéria orgânica ($69,96 \text{ kg ha}^{-1}$) encontrado na camada de 0 a 10 cm para a distância a 50 cm do estipe, dados não apresentados devido à não-interação entre distância e profundidade para esse atributo (Tabela 5). A maior deposição de material na superfície do solo a 50 cm do estipe ($0,6 \text{ t ha}^{-1}$ Tabela 4) também corrobora a diferença significativa entre as distâncias (50 vs 150 e 50 vs 250). O menor valor de densidade observado na camada superficial a 50 cm do estipe condiz com a maior porosidade total (52,68 %) dados não apresentados.

SANTOS (2007) observou que em superfície o solo está mais bem estruturado devido ao crescimento de raízes e ao aporte de material orgânico pela vegetação florestal corroborando com os dados apresentados nesse estudo onde a menor densidade foi observada na camada superficial mais próxima ao estipe das palmeiras.

A matéria orgânica do solo influencia direta e indiretamente as propriedades do solo, e a redução no teor de carbono orgânico total do solo está relacionada à sua degradação física, e seu incremento por meio de manejos adequados pode alterar a capacidade de carga dos solos, que se tornam menos vulneráveis à compactação (VIANA et al., 2011).

Kato et al. (2010) observaram uma correlação linear negativa entre a densidade do solo e a porosidade, portanto, maiores densidade correspondem a menores porosidades (NOGUEIRA et al., 2004).

A maior porosidade na camada superficial pode ser decorrente da maior concentração de raízes que confere ao solo agregação e estruturação, pois o teor de

matéria orgânica nas camadas superficiais é maior, o que diminui a densidade por efeito direto da menor densidade da matéria orgânica e por efeito indireto relacionado à maior agregação proporcionada pela matéria orgânica (WENDLING et al., 2012). Além disso, ocorre intenso crescimento das raízes as quais melhoram a estabilidade dos agregados e aumentam a porosidade do solo após a senescência destas (MORALES et al., 2010; MARTINS et al., 2010).

4.4.CONCLUSÕES

- 1.** O C_{mic} , RB, qCO_2 e a MOS variam com o distanciamento horizontal em relação ao estipe de macaubeiras no Cerrado.
- 2.** O q_{Mic} , o NT e a relação C:N não variam horizontalmente em relação ao estipe de macaubeiras.
- 3.** O C_{mic} , RB, MOS, C:N e o NT tendem a reduzir seus valores com a profundidade.
- 4.** Os atributos avaliados apresentaram maior amplitude de variação em sentido vertical (profundidade) que em sentido horizontal (distância do estipe).
- 5.** O q_{Mic} e a D_s tendem a aumentar com a profundidade.
- 6.** Os estoques totais de carbono e nitrogênio não variam espacialmente até 250 cm de distância do estipe de macaubeiras para a profundidade de 0 a 30 cm, apesar da maior deposição de resíduos a 50 cm de distância do estipe.
- 7.** A densidade do solo altera tanto em função da variação horizontal quanto vertical.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. A.; ARGENTON, J.; BAYER, C.; WILDNER, L do P.; KUNTZE, M. A. G. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.415-424, 2005.

ALEF, K.; NANNIPIERI, **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**, London: Academic Press, 1995. 576 p.

ALMEIDA, D.; KLAUBERG FILHO, O.; FELIPE, A. F.; ALMEIDA, H. C. Carbono, nitrogênio e fósforo microbiano do solo sob diferentes coberturas em pomar de produção orgânica de maçã no sul do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.4, p.1069-1077, 2009.

ALVES, T dos S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.33, n.2, p.341-347, 2011.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.25, n.3, p.393-395, 1993.

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. S. indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.23, p.66-75, 2007.

ASSIS, C. P.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono e nitrogênio em agregados de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1541-1550, 2006.

BALOTA, E. L.; COLLOZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v.77, p.137-145, 2004.

BARETTA, D., BROWN, G. C.; CARDOSO, E. J. B. N. Potencial da macrofauna e outras variáveis edáficas como indicadores da qualidade do solo em áreas com *Araucaria angustifolia*. **Acta Zoológica Mexicana**, México, v.2, p.135-150, 2010.

BASTIDA, F.; ZSOLNAY, A.; HERNANDEZ, T.; GARCIA, C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. **Geoderma**, Amsterdam, v.147, n.3/4, p.159-171, 2008.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1 – Physical and Mineralogical Methods. 2 ed. Madison, WI: ASA/SSSA (Agron. Monogra., 9). p.363-375. 1986.

BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Nitrogen total. In: **Methods of soil analysis**. 2ed. American Society of Agronomy. Madison, USA. Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Agronomy Monograph n.9, p.591-641, 1982.

BRUSSAARD, L.; RUITER, P. C.; BROWN G. G. soil biodiversity for agricultural sustainability. **Agriculture Ecosystems and Environmental**, v. 121, n. 3, p.233-244, 2007.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; SILVA, C. A.; CURI, N.; FREITAS, A. F. de. Estoques de carbono e nitrogênio em solos sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 1028-1035, 2010.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. de; REIS, E. F. dos; PEREIRA, H. S. AZEVEDO, W. R. de. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.1, p.147-157, 2009.

COLODRO, G.; ESPÍNDOLA, C. R.; CASSIOLATO, A. M. R.; ALVES, M. C. Atividade microbiana em Latossol degradado tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.11, n.2, p.195-198, 2007.

COSTA, C. C. A.; CAMACHO, R. G. V.; MACEDO, I. D.; SILVA, P. C. M. Análise comparativa da produção de serrapilheira em fragmentos arbóreos e arbustivos em área de caatinga na Flona de Açú -RN. **Revista Árvore**, n.34, v.2, p.259-265, 2010.

CUNHA, E. de Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. de B.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 56-63, 2012.

D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; CARNEIRO, M. A. C. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região do Cerrado no sul do Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.913-923, 2002.

D'ANDREA, 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, p.179-186, 2004.

DINIZ, L. T.; RAMOS, M. L. G.; MELO, A. A.; LIMA, L. C.; SILVA, D. E.; COIMBRA, K. das G.; ALENCAR, C. M. Comportamento da matéria orgânica em relação à distância da base do caule em um Gleissolo sob macaubeiras nativas associadas à pastagem, no cerrado goiano. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2010, Natal. **Anais...** Centro Convenções Natal – RN, 2010a. CD-ROM.

DINIZ, L. T.; RAMOS, M. L. G.; MELO, A. A.; LIMA, L. C.; SILVA, D. E.; ALENCAR, C. M. Efeito da distância da base do caule na relação entre o carbono orgânico e nitrogênio total, em um solo sob macaubeiras nativas associadas à pastagem,

no cerrado goiano. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2010, Natal. **Anais...** Centro Convenções Natal – RN, 2010b. CD-ROM.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (ed.) **Defining soil quality for sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, v.35, p.3-21, 1994.

EILERS, K. G.; DEBENPORT, S.; ANDERSON, S.; FIERER, N. Digging deeper to find unique microbial communities: The strong effect of depth on the structure of bacterial and archaeal communities in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.50, p.58-65, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro - CNPS, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Classificação do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ed. Rio de Janeiro-CNPS, 1997. 212p.

FALL, D.; DIOUF, D.; ZOUBEIROU, A. M.; BAKHOUM, N.; FAYE, A.; SALL, S. N. Effect of distance and depth on microbial biomass and mineral nitrogen content under *Acacia Senegal* (L.) Willd Trees. **Journal of Environmental Management**, v. 95, p. S260-S264, 2012.

FRANÇA, A. M. da S. **Função de pedotransferência para estimativa de estoques de carbono em solo de áreas de Campo Limpo Úmido do Distrito Federal**. 2011. 144 fls. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

FRAZÃO, L. A.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Inorganic nitrogen, microbial biomass and microbial activity of a sandy Brazilian Cerrado, soil under different land uses. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.135, p. 161-167, 2010.

FERNANDES, M. M.; PEREIRA, M. G.; MAGALHÃES, L. M. S.; CRUZ, A. R.; GIÁCOMO, R. G. Aporte e decomposição da serrapilheira em área de floresta secundária, plantio de sabiá (*Mimosa caesalpinieafolia* Benth.) e andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) na Flona Mario Xavier, RJ. **Ciência Florestal**, v.16, n.2, p.163-175, 2006.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F. de; GAMA-RODRIGUES A. C.; SANTOS, G. A. S. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p. 893-901, 2005.

GAMA-RODRIGUES, E. F. da; GAMA-RODRIGUES, A. C. da; PAULINO, G. M.; FRANCO, A. A. Atributos químicos e microbianos sob diferentes coberturas vegetais no norte do estado do Rio de Janeiro, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1521-1530, 2008.

GAMA-RODRIGUES, E. E.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P., CAMARGO, F. A. O. Eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre, Metrópole, p. 159-170, 2008.

GIBSON, L.; LEE, T. M.; KOH, L. P.; BROOK, B. W.; GARDNER, T. A.; BARLOW, J.; PERES, C. A.; BRADSHAW, C. J. A.; LAURENCE, W. F.; LOVEJOY, T. E.; SODHI, N. S. Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity. **Nature**, London, v.478, p.378-383, 2011.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO JÚNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long term experiment with threes soil tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil and Ecology**, v.42, p.288-296, 2009.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A. A. da; SANTOS, A. A. dos, VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.38, n.2, p.118-127, 2008.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.42, p.1-13, 2010.

KATO, E.; RAMOS, M. L. G.; VIEIRA, D. de F. A; MEIRA, A. D.; MOURÃO, V. C. Propriedades físicas e teores de carbono orgânico de um Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado, sob diferentes coberturas vegetais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.26, p.732-738, 2010.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos avançados**, v. 24, n.68, p.223-253. Disponível em: [HTTP://www.scielo.br/pdf/ea/v24n68/17.pdf](http://www.scielo.br/pdf/ea/v24n68/17.pdf). Acesso em 6-12-2011.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, n.220, p.242-258, 2005.

LEITE, L. F. C.; JUNQUEIRA, N. T. V.; GALVÃO, S. R. da S.; IWATA, B. de F.; COSTA, C., do N.; LEMOS, J. de O. Atributos químicos e biológicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo exclusivo de macaúba e consorciado com pastagem na região central do Maranhão. **Comunicado Técnico**, 223. Embrapa, 2010.

LITTEL, R. C.; MILLIKEN, G. A.; STROUP, W. W. **SAS system for mixed models**. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1996, 633p.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; ALOVISI, A. M. T.; GOMES, S. F.; GASPARINE, A. S.; NUNES, C. M. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa agropecuária tropical**, Goiânia, v.41, n.1, p.20-28, 2011.

- MARISOLA FILHO, L. A. Cultivo e processamento de coco macaúba para a produção de biodiesel. Viçosa – MG, **Centro de Produções Técnicas – CPT**, 2009. 333p.
- MARSCHNER, P.; CROWLEY, D. E.; YANG, C. H. Development of specific rhizosphere bacterial communities in relation to plant species, nutrition and soil type. **Plant and Soil**, v. 261, p. 199-208, 2004.
- MARTINS, C. A. da S.; PANDOLFI, F.; PASSOS, R. R.; REIS, E. F. dos; CABRAL, M. B. G. Avaliação da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes coberturas vegetais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.26, n.1, p.79-83, 2010.
- MATIAS, M. da C. B. da S.; SALVIANO, A. A. C.; LEITE, L. F. de C.; ARAÚJO, A. S. F. de. Biomassa microbiana e estoques de C e N do solo em diferentes sistemas de manejo, no Cerrado do Estado do Piauí. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.3, p.517-521, 2009.
- MELO, A. W. F. **Avaliação do estoque e composição isotópica do carbono do solo no Acre**. 2003. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, Piracicaba, 2003.
- MEIRELLES, M. L.; FERREIRA, E. A. B.; FRANCO, A. C. **Dinâmica sazonal do carbono em Campo Úmido do Cerrado**. (Série Documentos, 164) Planaltina: Embrapa Cerrados, 29p., 2006.
- MERILES, J. M.; VARGAS G., S.; CONFORTO, C.; FIGONI, G.; LOVERA, E.; MARCH, G. J.; GUZMA'N, C. A. Soil microbial communities under different soybean cropping systems: Characterization of microbial population dynamics, soil microbial activity, microbial biomass and fatty acid profiles. **Soil and Tillage Reseachr**, v.103, p.271-281, 2009.
- MORALES, C. A. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A. de; MARANGONI, J. M.; STAHL, J.; CHAVES, D. M. Qualidade do solo e produtividade de Pinus taeda no planalto catarinense. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.20, n.4, p.629-640, 2010.
- MOREIRA, F. M de S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. Ed. Atual. e ampl. Lavras: UFLA, 2006. 729p.
- MOREIRA, C. S. **Estoques de carbono no solo em áreas de reflorestamento: bases para projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. 2010. 188 fls. Tese de Doutorado - Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; MACEDO, R. L. G.; MOREIRA, F. M. de S., D'ANDRÉA, A. F. Indicadores Biológicos da Qualidade do Solo em Sistemas Agrossilvopastoril no Noroeste do Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n1, p.105-112, 2009.
- NOGUEIRA, E. L. da S.; FERNANDES, A. R.; RUIVO, M. de L. P.; RODRIGUES, T. E.; SARRAZIN, M. A. Características físicas de um Gleissolo do rio Guamá sob diferentes sistemas de uso. **Revista Ciências Agrárias**, Belém, n.42, p.85-96, 2004.

OLIVEIRA, J. T.; MOREAU, A. M. S. S.; PAIVA, A. Q.; MENEZES, A. A.; COSTA, O. V. Características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra. **Revista brasileira de ciência do Solo**, v. 32, p. 2821-2829, 2008.

PAUL, E. A. **Soil microbiology, ecology, and biochemistry**. Academic Press, Burlington, 3 ed. 532p, 2007

PAULETTO, E. A.; BORGES, J. R.; SOUSA, R. O. de; PINTO, L. F. S.; SILVA, J. B. da; LEITZKE, V. W. Avaliação da densidade e da porosidade de um Gleissolo submetido a diferentes sistemas de cultivo e diferentes culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.11, n.2, p.207-210, 2005.

PILLON, C. N.; SANTOS, D. C. dos; LIMA, A. L. R. de; ANTUNES, L. O. Carbono e nitrogênio de um Argissolo Vermelho sob floresta, pastagem e mata nativa. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.3, 2011.

PÔRTO, M. L.; ALVES, J. do C.; DINIZ, A. A.; SOUZA, A. P de; SANTOS, D. Indicadores biológicos de qualidade do solo em diferentes sistemas de uso no brejo paraibano. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.4, p.1011-1017, 2009.

PRAGANA, R. B.; NÓBREGA, R. S. A.; RIBEIRO, M. R.; LUSTOSA FILHO, J. F. Atributos biológicos e dinâmica da matéria orgânica em Latossolos amarelos na região do Cerrado piauiense sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.851-858, 2012.

PULRONIK, K.; BARROS, N. F. de; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BRANDANI, C. B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no vale do Jequitinhonha-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, 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 Ciência Solo**, v. 31, p. 1609-1623, 2007.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; MELO, L. C. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. C de. Carbono orgânico e nitrogênio total do solo e suas relações com os espaçamentos de plantio de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 32, p. 2051-2059, 2008.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Comparação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. da; REICHERT, J. M. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.5, p.49-134, 2007

RESCK, B. S.; RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; GOMES, A. C. Estoque de carbono do solo sob diferentes sistemas de manejo na Bacia Hidrográfica do Córrego Taquara, Distrito Federal. In: Simpósio Nacional do Cerrado, 2008, Brasília. **Anais**. Brasília, Embrapa-CPAC, 2008.

- ROSENDO, J. dos S.; ROSA, R. Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de Cerrado. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, n.2, p. 359-376, 2012.
- RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter-a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. **Plant and Soil**, v.338, p.143-158, 2011.
- SAMPAIO, D. B.; ARAÚJO, A. S. F.; SANTOS, V. B. Avaliação de indicadores biológicos de qualidade do solo sob sistemas de cultivo convencional e orgânico de frutas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.2, p.353-359, 2008.
- SANTOS, E. dos. **Carbono, nitrogênio e relação C/N em Gleissolo e cambissolo sob diferentes tipologias vegetais na área de ocorrência da floresta ombrófila densa, Antonina – PR**. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- SAS Institute, **User's guide**. Versão 9.1.3, versão para Windows. Cary, NC, USA, 2008.
- SAVIOZZI, A.; BUFALINO, P.; LEVI-MINZI, R.; RIFFALD, R. Biochemical activities in a degraded soil restored by two amendments: A laboratory study. **Biology and Fertility of Soils**, v.35, p. 96-101, 2002.
- 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 Campo das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.5, p.1585-1592, 2010.
- SIMÕES, S. M. O.; ZILLI, J. E.; COSTA, M. C. G.; TONINI, H.; BALIEIRO, F. de C. Carbono orgânico e biomassa microbiana do solo em plantios de *Acacia mangium* no Cerrado de Roraima. **Acta Amazonica**. v.40, n.1, p.23-30, 2010.
- SIQUEIRA NETO, M. **Estoque de carbono e nitrogênio do solo com diferentes manejos no Cerrado goiano**. Tese (Doutorado – Programa de Pós-graduação em Ciências – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicabna, 159p., 2006.
- 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**. Victoria, v.30, n.2, p.195-207, 1992.
- STEVENSON, F. J.; COLE, M. A. **Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. 2 ed. New York: J. Wiley, 1999. 427p.
- STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2. ed. New York: Wiley, 1994.
- SUAREZ, P. A. Z.; SANTOS, A. L. F.; RODRIGUES, J. P.; ALVES, M. B.; Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. **Química Nova**, v.32, p.768-775, 2009.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores de qualidade dos solos. In: ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F. de; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (ED.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: **Sociedade brasileira de ciência do solo**, v.2, p. 195-276, 2002.

TU, C.; RISTAINO, J. B.; HU, S. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming system: effects of organic inputs and straw mulching. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.38, p.247-255, 2006.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C. JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**. Oxford, v.19, n.6, p. 703-707, 1987.

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.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENTA, C. A. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.2105-22114, 2011.

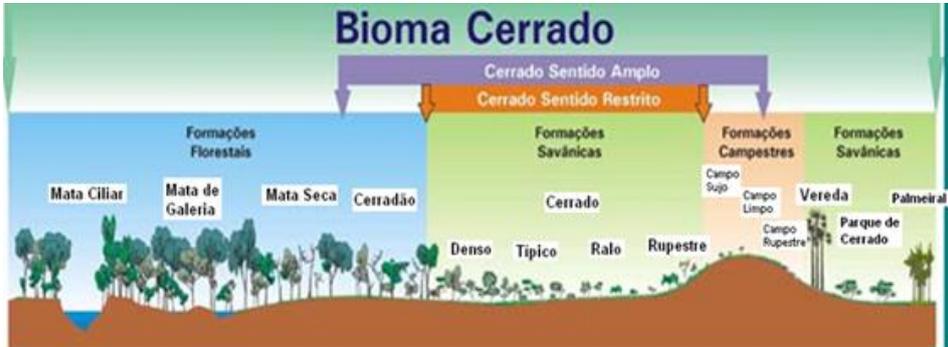
WARDLE, D. A. Metodologia para a quantificação da biomassa microbiana do solo. In: HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R. S. **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Embrapa, Brasília, DF. 543, 1994.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, de R. C.; BABATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de *pinus*, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, p.256-265, 2012.

ZINN, Y.L.; DIMAS, V.S. & SILVA, J.E. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology Management**, 166:285-294, 2002.

5. ANEXOS

A. FITOFISIONOMIAS DO BIOMA CERRADO



Os palmeirais são formados pelas espécies: *Acrocomia aculeata* (macaúba); *Syagrus oleracea* (gueroba) e *Attalea speciosa* (babaçu), caracterizando respectivamente os subtipos Macaúbal, Guerobal e Babaçu.

Mapa demonstrativo dos tipos de vegetação do bioma Cerrado
Fonte: www.agencia.cnptia.embrapa.br, com adaptações.

Ilustração: José Felipe Ribeiro

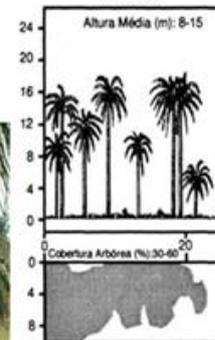


Ocorrência de macaúba em formação savânica do Cerrado com vegetação do tipo palmeiral e subtipo macaúbal.



Ocorrência de macaúba em pastagem.

Macaúbal



Os palmeirais ocorrem em solos bem drenados e ricos em nutrientes, nos níveis de relevo que separam os fundos de vales (interflúvios).

B. AMOSTRAGEM DA ÁREA DE ESTUDO

Coleta de solo em mata de macaúbeiras nativas no Cerrado

indicadores de Qualidade do Solo (IQS):

1. Biológicos:

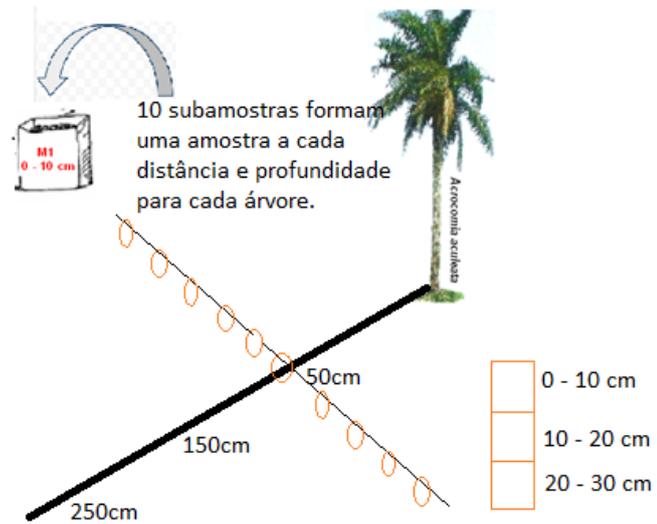
- A. Carbono microbiano (Cmic)
- B. Respiração basal (RB)
- C. Quociente metabólico (RB/Cmic)
- D. Quociente microbiano (Cmic:Corg)

2. Químicos

- A. Matéria orgânica (MOS)
- B. Nitrogênio total (NT)
- C. Relação C:N
- D. Estoques de C e N

3. Físico

- A. Densidade do solo (Ds)



Área com solo sob mata de macaúbas.

C. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

