**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**
**INSTITUTO DE GEOGRAFIA**
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOGRAFIA E GESTÃO DO TERRITÓRIO**

# ISÓTOPOS DE CARBONO ($^{13}C$) E A DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMAS CULTIVADOS NO CERRADO MINEIRO

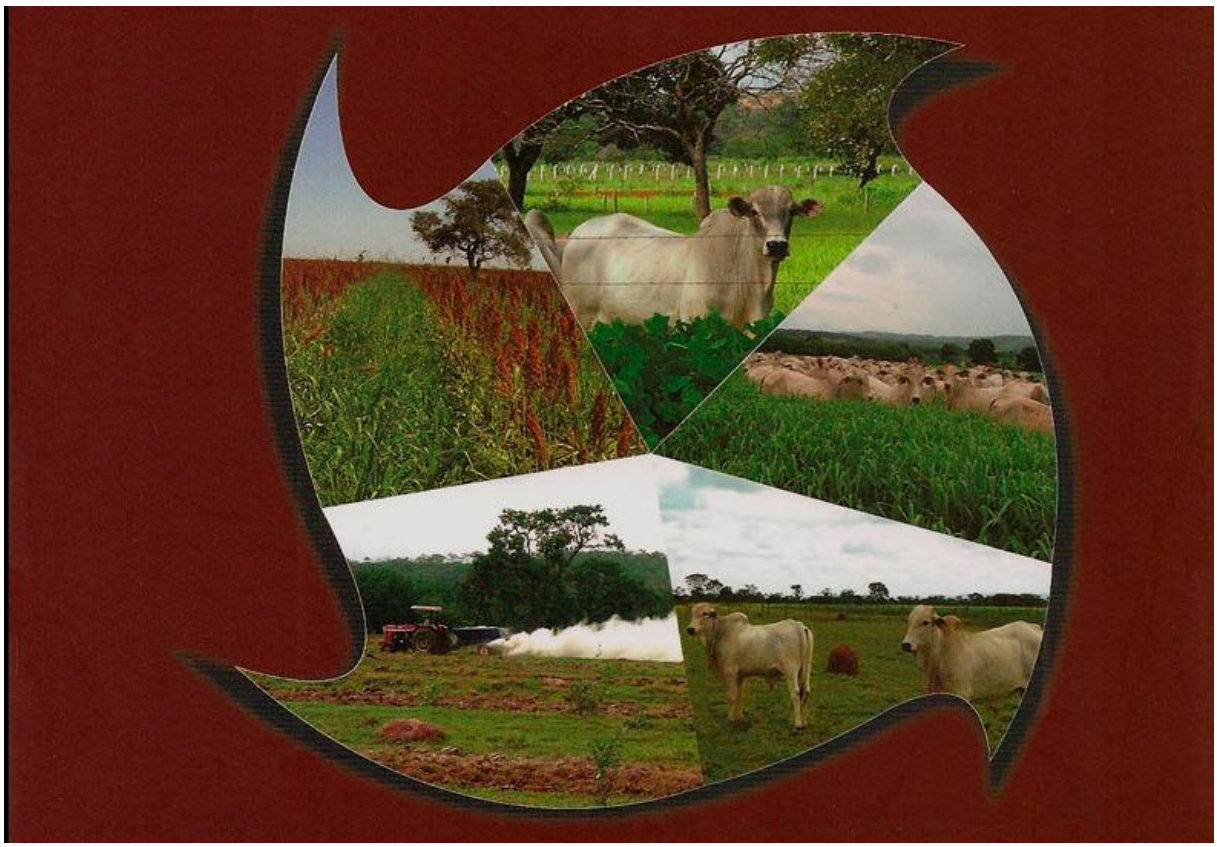
**THALITA MENDES RESENDE**

**UBERLÂNDIA/MG**

**2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**
**INSTITUTO DE GEOGRAFIA**
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOGRAFIA E GESTÃO DO TERRITÓRIO**

# ISÓTOPOS DE CARBONO ($^{13}C$) E A DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMAS CULTIVADOS NO CERRADO MINEIRO



**THALITA MENDES RESENDE**

**UBERLÂNDIA/MG**

**2015**

**THALITA MENDES RESENDE**

# ISÓTOPOS DE CARBONO ($^{13}C$) E A DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMAS CULTIVADOS NO CERRADO MINEIRO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor(a) em Geografia.

**Área de Concentração: Geografia e Gestão do Território**.

**Orientador:**
Prof. Dr. Jorge Luís Silva Brito

**Coorientadora:**
Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen
(UNESP – Rio Claro, SP)

**Uberlândia/MG**

**INSTITUTO DE GEOGRAFIA**

**2015**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R433i Resende, Thalita Mendes, 1986-
2015 Isótopos de carbono ($^{13}C$) e a dinâmica do carbono orgânico do solo em sistemas cultivados no cerrado mineiro / Thalita Mendes Resende. - 2015.
221 f. : il.

Orientador: Jorge Luís Silva Brito.
Coorientadora: Vânia Sílvia Rosolen.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Geografia.
Inclui bibliografia.

1. Geografia - Teses. 2. Latossolos - Teses. 3. Solos - Cerrado - Minas Gerais - Teses. 4. Solos - Composição - Teses. I. Brito, Jorge Luís Silva. II. Rosolen, Vânia Sílvia. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Geografia. IV. Título.

CDU: 910.1

# UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

## Thalita Mendes Resende

## Isótopos de Carbono ($^{13}C$) e a Dinâmica do Carbono Orgânico do Solo em Sistemas Cultivados no Cerrado Mineiro

**Prof. Dr. Jorge Luís Silva Brito**
(Instituto de Geografia / UFU)

**Profª. Drª. Vania Silvia Rosolen**
(Unesp – Rio Claro / SP)

**Prof. Dr. Marcelo Zacharias Moreira**
(CENA / USP – Piracicaba / SP)

**Prof. Dr. Elias Nascentes Borges**
(Instituto de Ciências Agrárias / UFU)

**Prof. Dr. Luiz Nishiyama**
(Instituto de Geografia / UFU)

Data: 20 de Março de 2015

Resultado: Aprovada com ressalvas

*Ao meu esposo Antônio,*
*pelo amor incondicional e apoio irrestrito*
*em todos os momentos!*

*E aos meus pais, Cleide e Antônio,*
*pelos ensinamentos e amor*
*ao longo da vida!*

***Dedico***

# AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus, autor da vida, por ter aberto caminhos e me revestido de força e sabedoria para atingir mais essa conquista!

Ao Prof. Dr. Jorge Luís Silva Brito pela confiança e apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

À minha amiga e fiel orientadora Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen, pelo exemplo profissional e pela permanente disponibilidade de auxílio ao longo da graduação, mestrado e doutorado. Agradeço a confiança em mim depositada, o carinho, paciência, apoio, disposição e incentivo durante a realização deste trabalho. De forma especial, agradeço o estímulo e inspiração para realização do Doutorado-sanduíche na França. Essa foi, sem dúvida, uma das maiores experiências da minha vida.

Ao Dr. Martial Michel Yoric Bernoux, meu 'orientador francês', por compartilhar seus conhecimentos de maneira tão generosa, contribuindo e enriquecendo os resultados e discussões da tese. *Merci beaucoup*!

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), ao Instituto de Geografia (IG) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pela oportunidade e apoio recebido para elaboração deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida no Brasil e no exterior, mediante participação no Programa de Doutorado-Sanduíche no Exterior (PDSE) realizado na França.

Ao *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD), em especial ao Laboratório *UMR Eco & Sols*, pela oportunidade de realização do estágio. Ao Martial Bernoux e demais Pesquisadores e aos secretários Farid Meddaci e Michelle Tigny por me acolherem de maneira tão atenciosa e carinhosa. Agradeço ainda aos colegas, em especial a querida Zohra, Johanne Sérié, Felipe, Yuanchao Fan e Julianne, que tornaram nossa estadia na França uma incrível 'troca' de conhecimentos, experiências, cultura, culinária e línguas.

Ao Prof. Dr. Marcelo Zacharias Moreira pelo aceite e disposição em participar da banca de defesa final, o que nos faz sentirmos honrados. Agradeço ainda pela realização das análises de carbono orgânico total e isotópico no Laboratório de Ecologia Isotópica – CENA/USP.

Ao Prof. Dr. Elias Nascentes Borges pelo carinho e auxílio constante durante a minha jornada acadêmica. Agradeço por sempre nos disponibilizar o Laboratório de Manejo de Solos (LAMAS) / Instituto de Ciências Agrárias – ICIAG/UFU, possibilitando a realização das análises de solo. Obrigada pelas importantes contribuições e pela participação no exame de

qualificação e na banca de defesa final. Suas sugestões e assistência colaboraram para conclusão desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Luiz Nishiyama pela parceria e apoio, disponibilizando o acesso aos equipamentos, materiais e espaço do Museu de Minerais e Rochas. Agradeço ainda pelo aceite e disposição em participar da banca de defesa final.

Ao Prof. Dr. José Silvio Govone pela disposição e auxílio na realização da meta-análise.

Aos Profs. Dr. Roberto Rosa, Dra. Ângela Soares, Dr. Martial Bernoux e Dr. Silvio Govone pelo aceite em participar como membros suplentes da banca de defesa final, me honrando com a leitura do trabalho.

Ao Sr. Christian Reinhold Hacker por autorizar a pesquisa em sua propriedade e fornecer pacientemente todas as informações sobre a rotina de uso e manejo do solo.

Ao técnico Marco Aurélio e estagiários do Laboratório de Manejo de Solos (LAMAS) / Instituto de Ciências Agrárias – UFU. Obrigada pela oportunidade, paciência e ajuda durante as realizações das análises granulométricas das amostras de solo.

Agradeço à Maria Beatriz e aos bolsistas do Museu de Minerais e Rochas pela paciência e disponibilidade de espaço ao longo das preparações de inúmeras amostras de solo.

À querida Eleusa Fátima e a todos meus companheiros do Laboratório de Cartografia e Sensoriamento Remoto agradeço pela amizade, parceria e incentivo.

Aos amigos Henrique Amorim Machado e Diogo Costa Nascimento, pela amizade e auxílio constante durante as coletas das amostras de solo no campo e análises físicas.

Ao Diogo Costa pela paciência e ajuda na elaboração dos mapas.

Ao Fabrício Pelizer de Almeida pela atenção e auxílio na realização das análises estatísticas.

Aos secretários do IG/UFU, João Fernandes, Yara, Cynara, Dilza, Izabel, Lúcia, Janete, Henrique e Mizmar por todos os serviços prestados.

Ao Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais (IEF) por ceder as imagens RapidEye/AG sensor REIS de junho de 2010 ao Laboratório de Cartografia e Sensoriamento Remoto do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia (LACAR/IG/UFU).

Agradeço, de maneira especial, ao meu esposo Antônio pelo imenso amor, carinho, companheirismo, compreensão, paciência e estímulo sempre, contribuindo para que eu alcançasse essa vitória. Agradeço ainda pela companhia e cumplicidade durante o Doutorado-sanduíche na França, tornando essa experiência algo indescritível. Seu amor, sua presença e seu apoio cotidiano, no Brasil e no exterior, fez toda diferença para o sucesso desse trabalho!

Aos meus pais, Cleide e Antônio, verdadeiros exemplos ao longo da vida; minha fortaleza, refúgio e sustento para que eu jamais desanimasse frente aos obstáculos. Sou grata pelo amor, amizade, atenção e incentivo sempre.

Ao meu irmão Marcelo, sempre presente em minha vida, também responsável por essa vitória!

Às minhas avós, Margarida e Altair, por todo o carinho, compreensão, apoio e orações.

A todos meus familiares e amigos(as). Certamente não chegaria até aqui sem o amor que sempre encontrei no abraço de vocês!

Enfim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, prestaram seu apoio na realização deste trabalho.

**Todos vocês foram fundamentais ao longo do caminho e jamais serão apagados da minha lembrança!**

*“[...] ao único Deus sábio, seja honra e glória para todo o sempre. Amém”.*
***1 Timóteo 1:17***

*“Teus, ó Senhor, são a grandeza, o poder, a glória, a majestade e o esplendor,*
*pois tudo o que há nos céus e na terra é teu.*
*Teu, ó Senhor, é o reino; tu estás acima de tudo.*
*A riqueza e a honra vêm de ti; tu dominas sobre todas as coisas.*
*Nas tuas mãos estão a força e o poder para exaltar e dar força a todos.*
*Agora, dou-te graças, e louvo o teu glorioso nome”.*
***1 Crônicas 29:11-13***

*"Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes."*
***Isaac Newton***

*"Se as coisas são inatingíveis... ora!*
*Não é motivo para não querê-las...*
*Que tristes os caminhos, se não fora*
*A presença distante das estrelas!"*
***Mário Quintana***

# RESUMO

RESENDE, Thalita Mendes. **Isótopos de Carbono ($^{13}C$) e a Dinâmica do Carbono Orgânico do Solo em Sistemas Cultivados no Cerrado Mineiro**. 2015. 221f. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2015.

Agricultura e pastagem dominam as paisagens que originalmente eram recobertas pela vegetação de Cerrado no Triângulo Mineiro (MG). A conversão de uso causa uma série de mudanças ambientais, entre elas os desequilíbrios nos estoques de carbono, na natureza das fontes de carbono e na redução do carbono ligado à biomassa acompanhados de modificações das propriedades e características como densidade, porosidade, entre outras. Por ser um compartimento importante para o estoque de carbono, os solos podem ser uma fonte ou um sumidouro de $CO_2$ atmosférico, dependendo do sistema de cultivo e manejo adotados. A microrregião de Uberlândia no Triângulo Mineiro (MG) apresenta extensas áreas ocupadas com pastagem. No entanto, as condições geológicas do solo e climáticas se constituem em fatores determinantes que podem acelerar a degradação dos solos quando a pastagem não é manejada adequadamente. Os objetivos desta pesquisa foram avaliar as alterações na matéria orgânica do solo (MOS), as mudanças do estoque de carbono orgânico do solo (Mg/ha de C), o teor e a natureza do carbono (%C e $\delta^{13}C$), a taxa de substituição do carbono derivado da vegetação nativa $C_3$ (em seus compartimentos estáveis e biodegradáveis) e do cultivo $C_4$ no solo e determinar o *turnover* da MOS e a eficiência da técnica de manejo para estocar o carbono em áreas recobertas com Cerrado nativo (CN - fitofisionomia Cerradão) e pastagem cultivada com 30 anos de implantação (P30). Estudou-se também um sistema misto e complexo representativo na região – uma área convertida inicialmente ao uso agrícola e os últimos 15 anos ocupada com pastagem cultivada (Agric+P15). Realizou-se ainda uma meta-análise, a partir de dados da literatura científica, com o intuito de avaliar variações do estoque de carbono do solo após mudança de uso incluindo diferentes áreas no Cerrado Mineiro. Os resultados mostraram que a conversão para sistemas cultivados resultou na diminuição da porosidade total (Pt) e no aumento da densidade do solo (Ds) quando comparados com os valores determinados para solos do Cerradão. No solo sob Agric+P15 houve um empobrecimento de teor de carbono (%C) especialmente em superfície se comparado à área sob vegetação nativa. No entanto, o solo recoberto com P30 apresentou valores mais próximos daqueles encontrados sob vegetação nativa, tanto em superfície quanto em subsuperfície, evidenciando a estabilidade do teor de carbono ao longo do tempo. Houve decréscimo do estoque da MOS nas camadas superficiais (0-15cm) dos solos cultivados, porém, na profundidade (30-60 cm), o estoque determinado em P30 se iguala ao estoque do solo sob Cerrado. Em Agric+P15 foram determinados os menores estoques em todas as profundidades. A técnica de manejo da pastagem mostrou-se eficiente em estocar carbono, principalmente se considerar a constituição arenosa do solo (entre 70 e 83% de areia). Os resultados mostraram que em Agric+P15 e em P30 houve incorporação do C derivado de vegetação $C_4$. A média de substituição da MOS derivada de plantas $C_4$ (em 0-15 cm) foi alta, sendo de 91,3% em Agric+P15 e de 99,6% em P30. Finalmente, o carbono derivado da vegetação nativa possui uma fração estável baixa (~2,2 t/ha de C) quando comparada com a fração biodegradável.

**Palavras-chave:** Cerrado; Matéria orgânica do Solo; Estoque de carbono; Isótopos de Carbono; Latossolos; Pastagens.

# ABSTRACT

RESENDE, Thalita Mendes. **Carbon Isotopes ($^{13}C$) and the Soil Organic Carbon Dynamics in the cultivated systems in Cerrado (Brazilian Savannah) Mineiro**. 2015. 221p. Thesis (Doctorate in Geography). Institute of Geography, University Federal of Uberlandia, Uberlandia, MG, 2015.

Agriculture and pasture dominate the landscapes that were originally covered by Cerrado vegetation in the Triangulo Mineiro (MG). The use of conversion causes a range of environmental changes, for instance, the imbalances of the carbon stocks, the nature of carbon sources and the reduction of carbon attached to a biomass accompanied by the modifications of the properties and the soil characteristics such as density, porosity and others. Being an essential pool to carbon storage, the soils can be a source or a sink of atmospheric $CO_2$ that depending on the cultivation and the management system adopted. The micro-region of the Triangulo Mineiro (MG) in Uberlandia has extensive areas filled by pasture. However, the geological conditions of soil and the climate are important factors that may accelerate the soil degradation when pastures is not handled properly. The objectives of this research were to evaluate the alterations in soil organic matter (SOM), the variation in the stock of soil organic carbon (Mg/ha de C), the content and nature of carbon (%C e $\delta^{13}C$), the carbon replacement rate derived from the native vegetation $C_3$ (in their stable and biodegradable pools) and the $C_4$ crop in the ground and also to determine the turnover of SOM and the technical management efficiency to store carbon in areas covered with native Cerrado (CN - vegetation type Cerradão) and the cultivated pasture with 30 years of implementation (P30). It was studied a mixed and representative complex system in the region - an area that was initially converted to agricultural use and the last 15 years has been occupied with cultivated pasture (Agric+P15). It has been also done a meta-analysis from scientific literature data in order to evaluate the soil carbon storage alterations after changing of use including different areas in the Cerrado Mineiro. The results have shown that the conversion to cultivated systems had a decrease of total porosity (Pt) and an increase of soil density (Ds) when are compared with values determined for Cerradão soils. In soil under Agric+P15 there was an impoverishment of carbon content, especially, when compared to the surface area of native vegetation. Therefore, the soil covered with P30 showed values closer to those found in native vegetation in both surface and subsurface that was an evidence of a stability of the carbon content over time. There was a decrease of the storage of SOM on the superficial layers (0-15 cm) of the cultivated soil, however, in the depth (30-60 cm), the stock given in P30 is equivalent at the storage of the soil beneath Cerrado. In agric+P15 were determined lower inventories stock at all depths. The pasture management techniques was efficient in storing carbon, mainly if was taken the sandy soil formation (between 70 and 80% of sand). The results have shown that in Agric+P15 and in P30 there were an incorporation of C originated from vegetation $C_4$. The average replacement of SOM derived from $C_4$ plants (in 0-15 cm) was high, with 91,3% in Agric+P15 and 99,6% in P30. Finally, the carbon derivate of native vegetation had a low stable fraction (~2,2 t/ha de C) when is compared to the biodegradable fraction.

**Keywords:** Cerrado (Brazilian Savannah); Soil organic matter; Carbon storage; Carbon Isotopes; Oxisols; Pastures.

# RESUMÉ

RESENDE, Thalita Mendes. **Isotopes de Carbone ($^{13}C$) et Dynamique du Carbone Organique du Sol de Systèmes Cultivés dans le Cerrado du Minas Gerais.** 2015. 221 p. Thèse (Doctorat en Géographie). Institut de Géographie, Université de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2015.

Dans la Région dite du « Triangle Mineiro » de l'état du Minas Gerais, l'agriculture et les pâturages dominent les paysages qui étaient à l'origine occupés par la végétation du type Cerrado (c'est-à-dire, la savane brésilienne). Le changement d'affectation des terres s'accompagne d'une série de changements environnementaux, y compris des variations des stocks de carbone (C), de la nature des sources de C et la diminution du C de la biomasse, accompagnés par des changements des propriétés et caractéristiques du sol telles que la densité et la porosité, entre autre. Les sols, qui sont un compartiment important en termes de stock de C, peuvent être à la fois une source ou un puits de $CO_2$ atmosphérique, selon le système de culture et le mode de gestion adoptés. La microrégion d'Uberlândia dans le « Triangle Mineiro » (Minas Gerais) dispose de vastes zones occupées par du pâturage. Cependant, les conditions géologiques du sol et le climat sont des facteurs importants qui peuvent accélérer la dégradation des sols lorsque le pâturage n'est pas géré correctement. Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer les changements de la matière organique du sol (MOS), les changements dans le stock de C organique du sol (en Mg/ha de C), la teneur et la nature de C (%C et $\delta^{13}C$ respectivement), les taux de remplacement du C provenant de la végétation native de type $C_3$ (à la fois les compartiments stables et biodégradables) et des cultures de type $C_4$, et déterminer le turnover de la MOS et l'efficacité de la technique de gestion pour stocker le C dans des zones initialement couvertes de Cerrado natif (CN – du type « Cerradão ») et avec des pâturages cultivés depuis 30 ans (P30). L'étude a porté également sur un système mixte et complexe, représentative de cette région – une zone initialement convertie à un usage agricole, puis occupée par du pâturage planté depuis 15 ans (Agric+P15). De plus, une méta-analyse a été menée, à partir de données de la littérature scientifique, avec l'intention d'évaluer les variations des stocks du C du sol suite au changement d 'affectation des terres, pour les différentes régions du Cerrado du Minas Gerais. Les résultats ont montré que la conversion en systèmes agricoles a entraîné une diminution de la porosité totale (Pt) et une l'augmentation de la densité apparente du sol par rapport aux valeurs déterminées pour les sols sous savane (cerradão). Dans le sol du système Agric+P15 il y a eu une diminution de la teneur en C (C%), en particulier en surface, par rapport au sol sous végétation native. Cependant, le sol du système P30 a présenté des valeurs plus proches de celles trouvées pour la végétation native, à la fois en surface et en profondeur, illustrant une stabilité de la teneur en C avec le temps. Il était boursier baisse de MOS dans les couches de surface (0-15cm) de sols cultivés, mais en profondeur (30-60 cm), le stock donné dans P30 égale le stock du sol sous Cerrado. Il y a eu une diminution du stock de MOS dans les couches superficielles (0-15 cm) des sols cultivés, toutefois plus en profondeur (30-60 cm) le stock pour P30 égale celui pour le Cerrado. Dans la parcelle Agric+P15 les stocks étaient les plus faibles à toutes les profondeurs. La technique de gestion des pâturages a été efficace pour le stockage du C, en particulier compte tenu de la texture sableuse des sols (entre 70 et 83% de sable). Les résultats ont montré que dans Agric +P15 et P30 il y a eu une incorporation de C provenant de végétation de type $C_4$. Le taux de remplacement moyen par de la MOS dérivées de plantes $C_4$ (pour 0-15cm) était élevé, avec 91,3% pour la situation Agric+P15 et 99,6% pour P30. Enfin, le C dérivée de la végétation native présentait une faible fraction stable (~2,2 t/ha de C) par rapport à la fraction biodégradable.

**Mots-clés**: Cerrado; Matière organique du sol; Stock de carbone; Isotopes de Carbone; Oxisols (Latossols brésiliens); Pâturages.

# LISTA DE FIGURAS

**FIGURA 1:** Representação simplificada do ciclo do C e seus principais reservatórios e fluxos..... 08

**FIGURA 2:** Principais processos no solo que influenciam o teor de carbono no solo .....10

**FIGURA 3:** Representação dos principais estoques e fluxos do ciclo de carbono no solo ....18

**FIGURA 4:** Ganho por animal (kg/animal/ano) e por área (kg/ha/ano) em pastagens nativas e cultivadas no Cerrado .....35

**FIGURA 5:** Representação esquemática do processo de degradação de pastagens em suas diferentes etapas no tempo .....37

**FIGURA 6:** Distribuição do Carbono em perfis de solos do Cerrado sob pastagens cultivadas .....44

**FIGURA 7:** Localização da Fazenda Cachoeira no município de Uberlândia, Estado de Minas Gerais, Brasil (2013) .....48

**FIGURA 8:** Biomas do Brasil.....62

**FIGURA 9:** Vegetação do Estado de Minas Gerais, Brasil .....63

**FIGURA 10:** Representação dos tipos de vegetação do bioma Cerrado .....64

**FIGURA 11:** Distribuição espacial das classes de uso da terra no Bioma Cerrado referente ao ano de 2002 .....74

**FIGURA 12:** Articulação das Cartas Militares, publicadas pela Diretoria de Serviços Geográficos do Exército - DSG (1984) – Fazenda Cachoeira .....80

**FIGURA 13:** Área de estudo obtida através dos recortes das cenas (2230325 e 2230225) das imagens RapidEye (2010), composição colorida BGR .....82

**FIGURA 14:** Localização dos pontos de coleta das amostras de solo – Fazenda Cachoeira, município de Uberlândia, Estado de Minas Gerais, Brasil (2013) .....85

**FIGURA 15:** Trincheiras para coleta das amostras de solo nas profundidades 0-15 cm, 15-30 cm e 30-60 cm .....87

**FIGURA 16:** (1) Coletor de amostras de solo indeformadas tipo Uhland e (2) Amostras indeformadas em anéis volumétricos .....88

**FIGURA 17:** Mapa de Solo do Brasil.....110

**FIGURA 18:** Evolução do uso do solo nas áreas de coleta das amostras de solo na Fazenda Cachoeira – município de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (1979, 2000 e 2010).....117

**FIGURA 19:** Histórico do uso das diferentes áreas de coleta das amostras de solo – [1] Cerrado, [2] Sistema Misto = Agricultura + Pastagem 15 anos, e [3] Pastagem 30 anos – Fazenda Cachoeira, Uberlândia, MG, Brasil .....122

**FIGURA 20:** Teores de Carbono (%C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.....137

**FIGURA 21:** Estoque de Carbono (Est.C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012 .....141

**FIGURA 22:** Evolução das frações estável ($C_3$ estável) e biodegradável ($C_3$ lábil) do carbono derivado da vegetação nativa, e do carbono derivado de vegetação $C_4$ em solos sob introdução de sistemas cultivados – Município de Uberlândia (MG), 2012.....154

**FIGURA 23:** Procedimento do cálculo de Estoques de carbono (Est.C): Caso 1, recálculo do estoque a partir da densidade e do teor de C; Casos 2 e 5, cálculo elementar; Caso 3, cálculo da Ds a partir de dados do estoque de C e do teor de C; Caso 4, determinação da Ds em função de equações (BERNOUX et al., 1998, p.4); Caso 6, nenhum cálculo, apenas o estoque é levado em conta.....158

**FIGURA 24:** *Forest plot* – Meta-análise mostrando a variação do estoque de carbono orgânico do solo por profundidade de 0-30 cm (A) e por massa equivalente de solo (B) após desmatamento.....162

# LISTA DE TABELAS E QUADROS

**TABELA 1:** Estimativa do potencial de sequestro de carbono por práticas agrícolas .....29

**TABELA 2:** Área – hectares, ocupada pelas diferentes classes de uso da terra nos estados cobertos pelo Bioma Cerrado .....33

**TABELA 3:** Estimativa da distribuição relativa dos principais gêneros e espécies de gramíneas forrageiras cultivadas na região do Cerrado do Brasil .....34

**TABELA 4:** Emissão de metano ($CH_4$) e dióxido de carbono ($CO_2$) por bovinos adultos consumindo forragem e sal mineral e sequestro de $CO_2$ em pasto bem manejado com *Brachiaria* .....41

**TABELA 5:** Acúmulo de C (Mg/ha) em solos sob diferentes pastagens.....42

**TABELA 6:** Classes de uso e ocupação do solo no Bioma Cerrado (em hectares) .....73

**TABELA 7:** Categoria de uso e/ou ocupação do solo em cada ponto de coleta na área de pesquisa – Fazenda Cachoeira (2012) .....84

**TABELA 8:** Categorias de solo e sua relação com as classes de solos originais do mapeamento de solo da EMBRAPA / FAO .....108

**TABELA 9:** Correlação entre as classes do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA 1999 e 2013) .....109

**TABELA 10:** Histórico do uso referente aos Pontos de Coleta de Solo – Fazenda Cachoeira, Município de Uberlândia (MG), 2013 .....118

**TABELA 11:** Análise Textural em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.....125

**TABELA 12:** Porosidade total (Pt), Macroporosidade (Ma) e Microporosidade (Mi) ($cm^3/cm^3$) das amostras de solo sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.....128

**TABELA 13:** Densidade (Ds, em $g/cm^3$) das amostras de solo sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012 .....131

**TABELA 14:** Teor do Carbono (%C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.....134

**TABELA 15:** Dados estatísticos de Teor de Carbono (%C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.....138

**TABELA 16:** Estoque de Carbono (Est.C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012 .....140

**TABELA 17:** Natureza do Carbono ($\delta^{13}C$) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012 .....147

**TABELA 18:** Carbono derivado de vegetação $C_3$ e $C_4$ em solos sob Vegetação Nativa de Cerrado (CN) e Sistemas Cultivados (Agric+P15 e P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012 .....152

**TABELA 19:** Variações dos conteúdos de carbono segundo sua origem, para a camada de 0-30 cm em t/ha, numa cronossequencia de introdução de sistemas cultivados no Cerrado Mineiro, em comparação com os dados apresentados por Cerri e Andreux (1990) em São Paulo (Canavial) e na Amazônia (Pastagem)..... 156

**QUADRO 1**: Fotos das categorias de uso e/ou pontos de coleta das amostras de solo na Fazenda Cachoeira, município de Uberlândia, Estado de Minas Gerais, Brasil .....86

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Agric+P15 – sistema misto com implantação inicial de Agricultura e há 15 anos sob Pastagem

BIO – Biomassa Microbiana

C – Carbono

$^{13}C$ – um dos isótopos estáveis de carbono

$C_3$ – Ciclo de carboxilação $C_3$ (ou de Calvin) – as plantas de ciclo $C_3$ fixam o $CO_2$ atmosférico através da enzima RUBISCO

$C_4$ – Ciclo de carboxilação $C_4$ – as plantas de ciclo $C_4$ fixam o $CO_2$ atmosférico através da enzima PEP *carboxilase*

$CdVC_4$ – Carbono derivado da vegetação $C_4$ (cultura introduzida)

$CdVC_3$ – Carbono derivado da vegetação $C_3$

$CdVC_3e$ – Fração estável do carbono derivado da vegetação $C_3$

CENA – Centro de Energia Nuclear na Agricultura

CIS (*SIC*) – Carbono Inorgânico do Solo (*Soil Inorganic Carbon*)

CMOV – Carbono da Matéria Orgânica Viva

CMOM – Carbono da Matéria Orgânica Morta

$CO_2$ – Dióxido de Carbono

COM – Matéria Orgânica Quimicamente Protegida

COS (*SOC*) – Carbono Orgânico do Solo (*Soil Organic Carbon*)

COT – Carbono Orgânico Total

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

Ct – Conteúdo Total de Carbono no Solo

Ds – Densidade do solo

dp – Desvio Padrão

DPM – Material Vegetal Decomponível

DSG – Diretoria de Serviços Geográficos do Exército

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPAMIG – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

GEE – Gases de Efeito Estufa

GPS – *Global Positioning System*

ha – Hectare

HUM – Matéria Orgânica Humificada

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IMO – Matéria Orgânica Inerte

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

Km² – Quilômetro quadrado

LAB – Lábil

LAC (*Low Activity Clay*) – Argila de Baixa Atividade

Ma – Macroporosidade

Mi – Microporosidade

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MO – Matéria Orgânica

MOS – Matéria Orgânica do Solo

N – Nitrogênio

P – Fósforo

PADAP – Programa de Assentamento Dirigido do Alto Paranaíba

PDB (*Pee Dee Belemnite)* – Rocha calcária dolomítica originária da formação geológica *Pee Dee*

pH – Potencial Hidrogeniônico

POLOCENTRO – Programa de Desenvolvimento dos Cerrados

POM – Matéria Orgânica Fisicamente Protegida

Prof. – Profundidade

Pt – Porosidade Total

P30 – Pastagem há 30 anos

RPM – Material Vegetal Resistente

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SISEMA – Sistema Estadual de Meio Ambiente

SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas

TIFF – *Tagged Image File Format*

TM – *Thematic Mapper*

VN – Vegetação Nativa

# LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

$CO_2eq$ – Dióxido de carbono equivalente

Mg – Megagrama (= $10^6$ g)

Gg – Gigagrama (= $10^9$ g)

Tg – Teragrama (= $10^{12}$ g)

Pg – Petagrama (= $10^{15}$ g)

ha – hectare (= 10.000 m²)

kg/$m^2$ de C – Quilograma de carbono por metro quadrado

Mg/$m^2$ de C – Megagrama de carbono por metro quadrado

Mg/ha de C – Megagrama de carbono por hectare

Mg/ha/ano – Megagrama por hectare por ano

% – por cento

‰ – por mil

$\delta^{13}C$ – Valor isotópico do carbono

U$ - Moeda / Dólar Americano

# SUMÁRIO

**INTRODUÇÃO .....01**

**CAPÍTULO I: REFERENCIAL TEÓRICO .....06**

1.1. Matéria Orgânica do Solo (MOS) e Estoque de Carbono .....07
1.1.1. Reservatórios de Carbono e Matéria Orgânica do Solo .....07
1.1.2. Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo no Cerrado.....14
1.1.3. Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo – MO Lábil e MO Estável .....17
1.1.4. Técnica do Isótopo Estável $^{13}C$ nos Estudos da Dinâmica do Carbono.....21
1.1.5. O Solo Agrícola e o Mercado Internacional de Carbono .....24
1.2. A Introdução de Pastagens Cultivadas no Cerrado: Alterações no Estoque de Carbono no Solo.....33

**CAPÍTULO II: LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO.....46**

2.1. Clima .....49
2.2. Geologia e Solos .....51
2.3. Relevo .....55
2.4. Vegetação .....61
2.5. A ocupação do Cerrado e a Conversão da Vegetação nativa em Sistemas Cultivados .....70

**CAPÍTULO III: MÉTODO E TÉCNICAS DA PESQUISA .....75**

3.1. Mapeamento da evolução do uso e/ou ocupação do solo na área de pesquisa.....76
3.1.1. Materiais utilizados .....77
3.1.2. Procedimentos Operacionais .....79
3.2. Amostragem de Solo .....83
3.3. Análises .....88
3.3.1. Análise Textural .....88

3.3.2. Cálculo da Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi) e Porosidade Total (Pt) do Solo .....90
3.3.3. Cálculo da Densidade do Solo (Ds) .....92
3.3.4. Análise do Carbono Orgânico Total (%C) e do Isótopo de Carbono ($\delta^{13}C$) .....93
3.3.5. Determinação do Estoque de Carbono (Est.C) .....96
3.3.6. Cálculo do Carbono derivado da vegetação $C_3$ e Carbono derivado da vegetação $C_4$ .....98
3.3.7. Cálculo do Carbono derivado da vegetação nativa $C_3$ estável ($C_3$-estável) e biodegradável ($C_3$-lábil) .....101
3.3.8. Análise Estatística .....103
3.4. Teste de Meta-análise incluindo algumas situações no Cerrado Mineiro .....104
3.4.1. Banco de Dados .....106
3.4.2. Meta-análise .....112

**CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO .....115**

4.1. Evolução do Uso do Solo na Área de Estudo .....116
4.2. Caracterização Física do Solo sob vegetação nativa de Cerrado e sob Sistemas Cultivados.....122
4.2.1. Textura .....123
4.2.2. Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma) e Porosidade Total (Pt) .....127
4.2.3. Densidade do Solo (Ds) .....130
4.3. Teor do Carbono Orgânico (%C) em solos sob vegetação nativa de Cerrado e em solos sob Sistemas Cultivados .....133
4.4. Estoque de Carbono (Est.C) em solos sob vegetação nativa de Cerrado e em solos sob Sistemas Cultivados .....138
4.5. Evolução da Matéria Orgânica sob Sistema Cultivado .....145
4.5.1. Natureza e Evolução do Carbono Orgânico do Solo ($\delta^{13}C$) .....145
4.5.2. Evolução das frações estável ($C_3$ estável) e biodegradável ($C_3$ lábil) do carbono derivado da vegetação nativa .....153
4.6. Variação do estoque de carbono orgânico do solo após mudança de uso: teste de meta-análise incluindo algumas situações no Cerrado Mineiro .....157
4.6.1. Análise do banco de dados .....157
4.6.2. Impacto da conversão sobre o estoque de carbono orgânico do solo .....159

**CONCLUSÕES .....164**

**REFERÊNCIAS .....170**

**ANEXOS .....198**

# INTRODUÇÃO

# INTRODUÇÃO

No Brasil, o bioma Cerrado é o segundo maior em extensão geográfica, apresenta acentuada sazonalidade e interferência antrópica (SANO et al., 2007) e é também uma das maiores áreas cultivadas do mundo (SIQUEIRA NETO et al., 2009). No Estado de Minas Gerais, áreas originalmente recobertas por Cerrado correspondem a 57% da área total sendo que mais de 2 milhões de hectares estão sob cultivo (SANO et al., 2008). A conversão de áreas de Cerrado em sistemas de cultivo, com derrubada e queima da vegetação natural, pode reduzir os teores da matéria orgânica do solo, acarretar a perda da fertilidade e aumentar a erosão (BERNOUX et al., 2004).

A rápida degradação do solo que pode acontecer com a exploração agropecuária no mundo, e mais acentuadamente nos países tropicais e em desenvolvimento, despertou, nas últimas décadas, a preocupação com a qualidade do solo e a sustentabilidade da exploração agrícola (LAL; PIRCE, 1991). A degradação ocorre quando a vegetação nativa e a fauna são destruídas, a camada mais fértil do solo é perdida, removida ou enterrada e a qualidade e regime de vazão do sistema hídrico são alterados causando profundas mudanças no ecossistema, tornando-se inviável a exploração sócio-econômica e ambiental da área (IBAMA, 1990). Dentre os principais processos causadores da degradação do solo cita-se a perda da matéria orgânica (MO).

A qualidade do solo pode ser monitorada por meio de um conjunto mínimo de variáveis químicas, físicas e biológicas que são capazes de detectar as alterações da qualidade do solo em função do manejo (LARSON; PIRCE, 1994). Dentre estas variáveis, encontra-se o carbono orgânico total (COT) ou matéria orgânica do solo (MOS).

A matéria orgânica do solo é composta por resíduos vegetais em estados variados de decomposição, pela biomassa microbiana e pela fração húmica mais estável (THENG; TATE; SOLLINS, 1989). O teor de matéria orgânica no solo é muito sensível às práticas de manejo, principalmente nas regiões tropicais, onde nos primeiros anos de cultivo, mais de 50% da MO previamente acumulada pode ser perdida por diversos processos, como a decomposição microbiana e a erosão (ANDREUX, 1996). A temperatura elevada e as condições de umidade dos trópicos aceleram os processos bioquímicos do solo e, quando associados a sistemas convencionais de preparo do solo, diminuem a proteção física da MO (CONCEIÇÃO, 2006). Nestas condições, as taxas de mineralização são maiores que as taxas de adição de resíduos orgânicos, diminuindo, portanto, o estoque de MO e contribuindo para a emissão de $CO_2$ à atmosfera. Inicia-se assim, um processo de degradação física, química e biológica do solo com redução da produtividade e aumento da erosão que retroalimentam o processo de degradação (MIELNICZUK, 1988).

Os solos são importantes reservatórios de carbono e armazenam aproximadamente 1.500 Gt de C, ou seja, cerca de duas vezes o estoque da atmosfera e três vezes a quantidade estocada na biomassa terrestre (CERRI et al., 2007). Particularmente os solos do Cerrado brasileiro estocam aproximadamente entre 4 e 5 $kg/m^2$ de C, apresentando áreas cujos estoques diminuem e variam entre 1,5 e 4 $kg/m^2$ de C (BERNOUX et al., 2002). Mudanças no uso do solo e no manejo podem induzir à diminuição do estoque de carbono e ao aumento da quantidade dos gases do efeito estufa liberados para a atmosfera. No Brasil, 75% do $CO_2$ vêm da agricultura e da mudança do uso da terra e a variação dos teores de carbono do solo é uma função do uso. Em síntese, mudança do uso da terra no país, com a introdução da agropecuária, representa mais de dois terços do total das emissões nacionais de $CO_2$ (CERRI et al., 2007).

Em virtude da rápida conversão da vegetação original em sistemas agrícolas, atualmente apenas 51,54% compõem as áreas de remanescentes da vegetação original do bioma Cerrado e, apenas 5,2% da área total está protegida sob a forma de alguma política de conservação (MMA, 2010). A taxa anual de conversão do uso do solo entre os anos de 1999 e 2005 foi de 1,55% (JEPSON, 2005). Sano et al. (2008) identificaram 80 milhões de hectares sob diferentes usos da terra do bioma Cerrado, o que corresponde a 39,5% da área total do Cerrado. As duas classes mais representativas de uso da terra são as pastagens cultivadas e as culturas agrícolas, que ocuparam 26,5 e 10,5% do Cerrado, respectivamente. Segundo Barcellos (1996), 80% da área total de pastagens cultivadas estão degradadas.

A conversão do Cerrado em pastagens, devido à baixa produtividade das pastagens naturais, ou seja, aquelas formadas após o corte e a queima do Cerrado que, em virtude de limitações climáticas e edáficas são de baixa qualidade e quantidade, estimulou a introdução de pastagens com espécies vegetais africanas (*Brachiaria, Panicum* e *Andropogon*) mais produtivas e com maior potencial de aumento do estoque de carbono no solo (SAVIDAN et al., 1985; BALBINO et al., 2002; CERRI et al., 2003; MARCHÃO et al., 2009).

A microrregião de Uberlândia no Triângulo Mineiro (MG) apresenta extensas áreas ocupadas com pastagem. No entanto, as condições geológicas e de solo, associadas com as condições climáticas, se constituem em fatores determinantes que podem acelerar a degradação dos solos.

Os objetivos desta pesquisa foram [1] avaliar as alterações na matéria orgânica e incorporação do carbono no solo em áreas recobertas com Cerrado arbóreo natural (CN – fitofisionomia Cerradão), pastagem cultivada com 30 anos de implantação (P30) e um sistema misto e

complexo representativo na região – uma área convertida inicialmente ao uso agrícola e os últimos 15 anos ocupada com pastagem cultivada (Agric+P15); e [2] analisar a variação do estoque de carbono após mudança de uso, a partir de um teste de meta-análise incluindo algumas situações no Cerrado mineiro.

Para cumprir os objetivos foram feitas análises das propriedades físicas do solo (Ma, Mi, Pt e Ds), a determinação do teor (C%), estoque (Est.C) e assinatura isotópica do carbono do solo ($\delta^{13}C$) os quais permitiram o cálculo do fracionamento do carbono – % de C derivado da vegetação $C_3$ e de C derivado da vegetação $C_4$ e da estimativa das frações estável e biodegradável do carbono – % de C derivado da vegetação $C_3$ estável ($C_3$-estável) e biodegradável ($C_3$-lábil). Finalmente, foi aplicado o teste de meta-análise incluindo algumas situações no Cerrado mineiro e identificado o impacto da conversão sobre o estoque de carbono orgânico do solo.

A área experimental está localizada na fazenda Cachoeira, município de Uberlândia/MG, entre as coordenadas 19º04’06” - 19º09’22” de latitude Sul e 48º33’37” e 48º36’31” de longitude Oeste, cuja escolha deveu-se a facilidade de acesso e incentivo do proprietário em pesquisa científica e por se tratar de uma área ocupada originalmente pela vegetação de Cerrado e com um histórico longo e preciso de conversão de uso do solo.

A opção em pesquisar especificadamente a pastagem foi fundamentada na percepção de que essa é uma região onde a economia está baseada na pecuária de corte e leite. Assim, os resultados obtidos a partir dessa pesquisa poderão auxiliar os produtores sobre a importância do manejo adequado das pastagens, evitando a degradação da qualidade e favorecendo a estabilidade do carbono do solo.

# CAPÍTULO I

# REFERENCIAL TEÓRICO

# CAPÍTULO I

# REFERENCIAL TEÓRICO

## 1.1.Matéria Orgânica do Solo (MOS) e Estoque de Carbono

### *1.1.1. Reservatórios de Carbono e Matéria Orgânica do Solo*

O carbono da Terra está estocado em cinco grandes reservatórios (MACHADO, 2005; LAL, 2006; IPCC, 2007):

- ✓ Oceanos, estimados em 38.000 Pg;
- ✓ Reserva geológica, estimada em cerca de 5.000 Pg, sendo composta de 4.000 Pg de carvão e 500 Pg para óleo e gás;
- ✓ Reserva pedológica ou de carbono do solo, composta por 1.550 Pg de carbono orgânico no solo (COS) e 950 Pg de carbono inorgânico no solo (CIS);
- ✓ Atmosfera, estimada em 750 Pg com aumento anual em torno de 3,3 Pg/ano;
- ✓ Reserva biótica, com 620 Pg incluindo 60 Pg por detritos materiais.

Os valores das reservas de carbono (C) podem variar de acordo com diferentes autores, no entanto, é importante destacar que, juntas, as reservas de C terrestre (pedológica + biótica) são responsáveis por 3.120 Pg (LAL, 2006) ou 3.060 Pg (DIECKOW et al., 2004) (Figura 1).

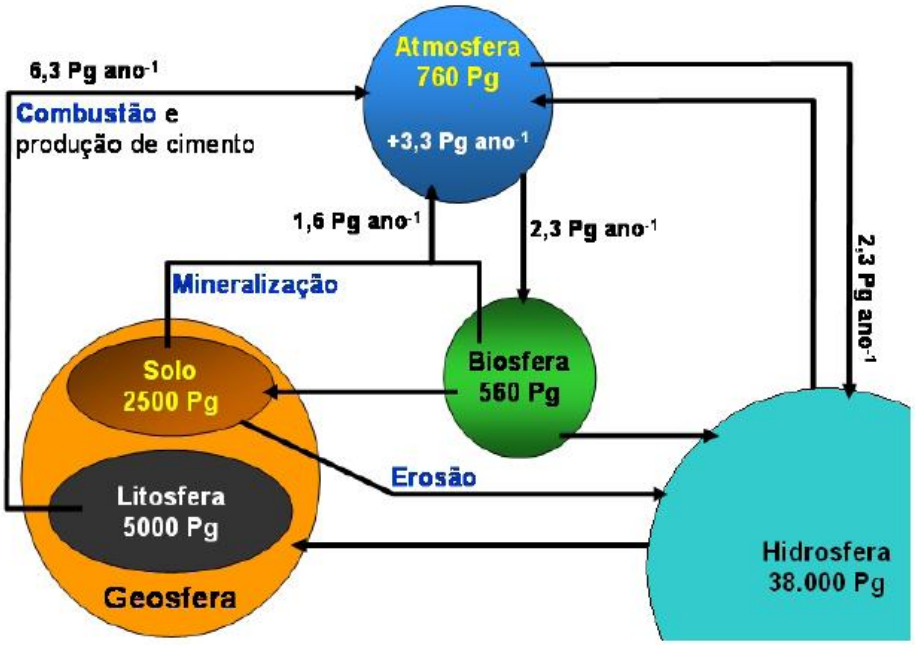



**Figura 1:** Representação simplificada do ciclo do C e seus principais reservatórios e fluxos.
Fonte: Dieckow et al. (2004, p.8)

Nos solos estão estocados de duas a três vezes mais carbono do que na vegetação e cerca de duas vezes mais quando comparado com a atmosfera. O estoque de C no solo, na camada entre 0-30 cm, é de cerca de 800 Pg de C (CERRI et al., 2006). Entretanto, é pertinente salientar que os solos são ecossistemas frágeis e manejos inadequados podem mineralizar a matéria orgânica e transferir grandes quantidades de gases do efeito estufa para a atmosfera (CERRI; CERRI, 2007).

De acordo com o IPCC (2007), o seqüestro de carbono pelos solos é o mecanismo responsável pelo maior potencial de mitigação de gases de efeito estufa (GEE), com uma estimativa de contribuição de 89%. São duas as principais opções para reduzir a taxa de enriquecimento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera: (1) redução das emissões e (2) seqüestro do carbono (SINGH; LAL, 2005).

As fontes potenciais de emissão de carbono do solo, de acordo com o IPCC (1997) *apud* Cerri et al. (2006), são três: (1) mudanças líquidas no estoque de carbono orgânico de solos minerais, associadas às mudanças no uso da terra e manejo; (2) emissões por calagem de solos agrícolas; (3) emissões provenientes de solos orgânicos cultivados.

Em geral, a conversão de ecossistemas naturais em ecossistemas agrícolas leva à perdas do carbono orgânico do solo (COS). A diminuição é causada pelo uso inapropriado de práticas de manejo agrícola, como aração, retorno do resíduo mínimo e aceleração da erosão (CERRI et al., 2006). Com a mudança no uso da terra ocorre um rápido declínio da matéria orgânica do solo (POST; KWON, 2000). Nos últimos anos o COS vem sendo sistematicamente quantificado tanto na forma de teores totais quanto na concentração encontrada nos diferentes compartimentos do solo (LEITE; MENDONÇA; MACHADO, 2004). Tal quantificação é possível devido à elevada capacidade que o solo tem, por meio do seu manejo, de reter ou transferir C para a atmosfera.

De acordo com Machado (2005) os três principais processos responsáveis pelo seqüestro de carbono nos solos são a humificação, a agregação e a sedimentação. Ao mesmo tempo, os processos responsáveis pelas perdas de carbono no solo são a erosão, a decomposição, a volatilização e a lixiviação (Figura 2).

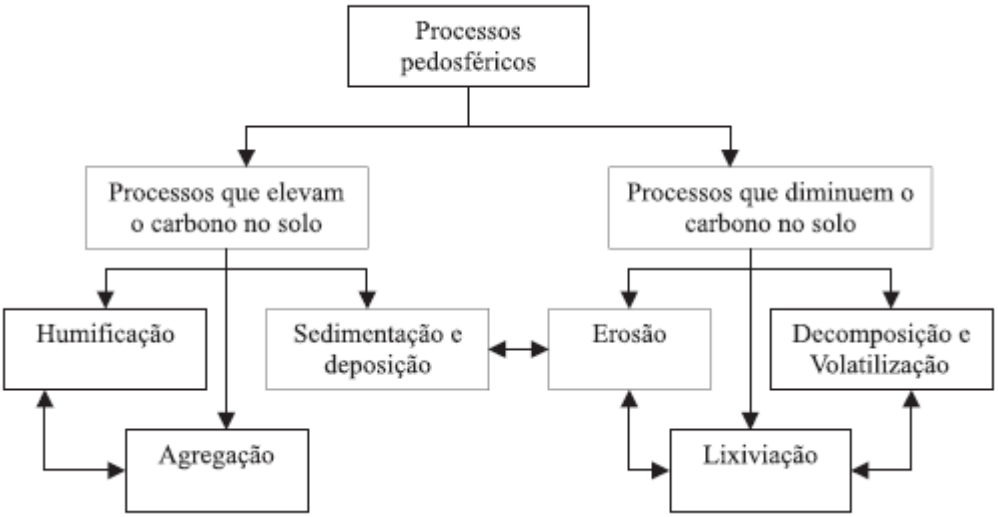



**Figura 2:** Principais processos no solo que influenciam o teor de carbono no solo.
Fonte: Machado (2005, p.332) adaptado de Lal, Kimble e Follet (1997)

O carbono orgânico do solo está presente na matéria orgânica viva, que corresponde a menos de 4% do carbono orgânico total do solo e na matéria orgânica morta, que corresponde à maior parte do carbono orgânico total do solo (cerca de 98%) (THENG, 1987).

O carbono da matéria orgânica viva (CMOV) subdivide-se em carbono presente nos microorganismos (60-80% do CMOV) consiste principalmente de fungos e bactérias e carbono presente nos macroorganismos (15-30% do CMOV) constituído, por exemplo, por minhocas, ácaros e térmitas terrestres (MACHADO, 2005).

Já o carbono da matéria orgânica morta (CMOM) subdivide-se na matéria macrorgânica, ou seja, resíduos vegetais recém-adicionados ao solo e no húmus (80-90% do CMOM), que se compõem de substâncias não húmicas (30% do carbono do húmus), representadas pelos ácidos orgânicos de baixo peso molecular (ex. ácido cítrico, ftálico e malônico) e substâncias húmicas (70% do carbono do húmus), representadas pelos ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas (MACHADO, 2005).

Nos solos tropicais a matéria orgânica tem grande importância como fonte de nutrientes para as espécies vegetais, para a retenção de cátions, complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes, estabilidade da estrutura, infiltração e retenção de água, aeração, e serve como fonte de C e energia aos organismos heterotróficos. Trata-se, portanto, de um componente fundamental do potencial produtivo destes solos.

Sob vegetação natural, o conteúdo de matéria orgânica do solo encontra-se estável. A conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas altera este conteúdo ocasionando, geralmente, uma redução acentuada quando se utiliza métodos de preparo com intenso revolvimento do solo e sistemas de cultura com baixa adição de resíduos vegetais.

Inicialmente, a temperatura e umidade elevadas são fatores importantes a considerar quando o objetivo é discutir o acúmulo e a dinâmica da matéria orgânica em solos tropicais. Temperatura e umidade elevadas resultam na intensificação dos processos químicos e bioquímicos e em elevadas taxas de decomposição. Contrabalanceando as elevadas taxas de decomposição, as regiões tropicais contribuem com elevadas taxas de produção de resíduos vegetais que retornam ao solo. E, sob estas condições naturais, o estoque do carbono do solo é garantido.

As quantidades de carbono (dC) adicionadas ($K_1A$) e perdidas ($-K_2C$) tem variação total expressa pela equação 1.

$$\frac{dC}{dt} = K_1.A - K_2.C \qquad (1)$$

Em que,

dC = quantidade de carbono;
dt = tempo;
$K_1$ = coeficiente da fração de carbono adicionado efetivamente retido no solo na forma de matéria orgânica;
A = carbono fotossintetizado adicionado ao solo na forma de resíduos exsudados radiculares e raízes (Mg/ha/ano);
$K_2$ = coeficiente da fração do carbono na matéria orgânica do solo perdido pela decomposição microbiana, erosão e lixiviação;
C = carbono da matéria orgânica do solo (Mg/ha).

Os coeficientes $K_1$ e $K_2$ representam, em base anual, a fração de carbono adicionado (A) efetivamente retido no solo na forma de matéria orgânica, e a fração do carbono na matéria orgânica do solo perdido pela decomposição microbiana, erosão e lixiviação, respectivamente (DALAL; MAYER, 1986).

Os coeficientes $K_1$ e $K_2$ são afetados pela temperatura, umidade, textura e mineralogia do solo, bem como práticas de manejo, em especial o grau de revolvimento do solo. Em regiões tropicais, a perda do carbono na matéria orgânica é maior; portanto o coeficiente $K_2$ é mais elevado, podendo alcançar valores de até 10% (0,10/ano) (CERRI; ANDREUX, 1990; BAYER; MIELNICZUK; MARTIN-NETO, 2000).

Já os valores de $K_1$ do C adicionado pela parte aérea das culturas variam entre 7,7 e 23% (BOLINDER et al., 1999). O C adicionado pelo sistema radicular apresenta maiores valores de $K_1$, o que tem sido relacionado aos maiores teores de lignina nas raízes, ou ainda ao fato de que ao promover a agregação do solo, intensifica-se a proteção física do C adicionado diretamente na matriz do solo (BALESDENT; BALABANE, 1992, 1996). Bolinder et al. (1999) apresenta a faixa de variação de $K_1$ para C derivado de raízes de 14,4 a 30%.

Geralmente, os coeficientes $K_1$ e $K_2$ são determinados utilizando-se técnicas isotópicas de C radioativo ($^{14}C$) ou a abundância natural do $^{13}C$ e sua discriminação relativa ao $^{12}C$ pelas plantas da rota metabólica $C_3$ em relação a rota $C_4$, aplicando-se a técnica da relação $\delta^{13}C$ (CERRI, 1986; BALESDENT; MARIOTTI; BOISGONTIER, 1990; GREGORICH; ELLERT; MONTREAL, 1995). De posse desses coeficientes e dos valores de A, cenários de manejo do solo podem ser simulados. Neste sentido, o conhecimento da dinâmica da matéria orgânica em regiões tropicais auxilia no entendimento da importância em adotar práticas de manejo do solo que determinem altas adições de C ao solo, bem como a diminuição das taxas de decomposição buscando o desenvolvimento de sistemas de produção sustentáveis.

Outro fator a ser considerado é a capacidade de proteção da matéria orgânica à ação decompositora dos microorganismos. Nos Latossolos, a proteção física da matéria orgânica se dá nos microagregados ou pela ligação com as superfícies minerais dos óxidos de ferro que possuem alta estabilidade química e são pouco afetadas pelos preparos do solo (OADES; GILLMAN; UEHARA, 1989). Nestes tipos de solo, o revolvimento e a exposição dos agregados do solo aos ciclos de umedecimento e dessecação e ao impacto das gotas de chuva disponibiliza à ação dos microorganismos e de suas enzimas a matéria orgânica anteriormente protegida (BALESDENT; CHENU; BALABANE, 2000). A proteção física da matéria orgânica no interior de agregados de solo (FELLER; BEARE, 1997) e a estabilidade química da matéria orgânica associada a superfícies oxídicas em solos de carga variável são importantes fatores determinantes dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais (PARFITT et al., 1997).

Quando os solos de constituição laterítica são convertidos em sistemas agrícolas baseados em práticas convencionais de manejo, apresentam rapidamente um declínio no estoque de matéria

orgânica. Tal empobrecimento está associado às condições climáticas mais favoráveis à decomposição microbiana, a quantidade de resíduos vegetais necessárias para manutenção dos estoques de matéria orgânica do solo e as técnicas de que rompem a agregação do solo. A recuperação dos estoques de C e N dos solos pode ser garantida por meio da proteção química e física da matéria orgânica que é, em última análise, um reflexo das técnicas de manejo.

Assim, a compreensão da dinâmica do carbono nos solos tropicais é fundamental para a adoção de sistemas de uso e manejo. Em tais regiões a degradação da fração orgânica do solo em condições inadequadas de manejo é rápida e vem acompanhada de um processo global de degradação das condições químicas, físicas e biológicas dos solos.

### *1.1.2. Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo no Cerrado*

Dentre os vários biomas tropicais, as Savanas recobrem cerca de 15% da área total terrestre, armazenando cerca de 15% do total de carbono (vegetação e profundidade de 1 metro de solo) sendo que o Cerrado brasileiro representa cerca de 9% da área total das Savanas Tropicais do mundo (BUSTAMANTE et al., 2006).

> Definida como Savana Sazonal Seca, o Cerrado consiste em um gradiente de fisionomias, que variam de pastos (localmente chamados de campo limpo) a formações florestais (Cerradão). Entre estes, existem fisionomias intermediárias com aumento da densidade de espécies arbóreas [...]. O tipo de fisionomia é usualmente dependente das condições climáticas locais (chuvas), propriedades físicas e químicas do solo, e intervenções humanas (remoção de árvores, fogo, pastagem). A região é considerada uma das 25 regiões de maior biodiversidade do mundo, áreas com alta biodiversidade, mas acelerada perda de *habitats*, principalmente devido a expansão das atividades agrícolas (BUSTAMANTE et al., 2006, p.286).

No Cerrado brasileiro foram determinadas taxas médias de acúmulo de C orgânico nos solos de 0,35 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ (BAYER et al., 2006). Os solos do Cerrado são representados quase que

exclusivamente por Latossolos, Neossolos Quartzarênicos e Argissolos que, em conjunto, recobrem aproximadamente 75% do Bioma (REATTO et al., 2008). São solos fortemente lixiviados, dessaturados, ácidos (pH entre 4,0 – 5,5), com alta concentração de Al trocável e constituído por argila de baixa atividade (LAC). A composição mineralógica comum associa caolinita, gibbsita, hematita e goethita e quartzo residual (MACEDO; BRYANT, 1987) cujos teores variam de acordo com a litologia e posição topográfica (VOLKOFF, 1985; CURI; FRANZMEIER, 1984).

Os solos do Cerrado são extremamente frágeis e a erosão superficial ou em sulcos, bem como a erosão vertical (camada subsuperficial adensada), se constituem em um dos maiores problemas ambientais. A maior porção da capacidade de troca catiônica (CTC) desses solos é proveniente da contribuição da MOS por ionização de grupos carboxílicos, enólicos e fenólicos. Neste bioma, a MOS desempenha um papel importante na reciclagem de nutrientes via ação dos organismos do solo, como fonte de energia e de substrato, no tamponamento do solo em relação às alterações de pH, na construção e na manutenção de sua estrutura, na adsorção e armazenamento de água (SILVA; RESCK, 1997). Assim, por ser o componente mais importante dos principais solos no Cerrado utilizados para a exploração agropecuária, a matéria orgânica deve ser discutida e compreendida sob uma perspectiva dinâmica, considerando o seqüestro de carbono, os processos de formação e acúmulo, os fluxos de $CO_2$, e a influência dos sistemas de manejo.

Se as condições naturais tropicais são determinantes para o comportamento do carbono orgânico levando quase sempre à rápida mineralização e diminuição dos teores quando a vegetação original é retirada, as opções de técnicas de manejo podem interferir neste processo. As transformações de uso da terra no Cerrado sofreram processo de aceleração após

a implementação de diversos programas de incentivo do governo federal na década de 1970, com destaque para o Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (Polocentro). Devido aos altos investimentos em corretivos, fertilizantes e variedades adaptadas de diversas culturas para as condições edafo-climáticas desse Bioma, houve uma ocupação desordenada da terra, com o aumento do desmatamento que contribuiu para a perda da biodiversidade de espécies nativas arbóreas, arbustivas e herbáceas. Simultaneamente, algumas técnicas inadequadas de manejo do solo propiciaram a rápida degradação desse recurso com a perda da matéria orgânica e dos nutrientes minerais.

Segundo Bayer et al. (2004) uma área superior a 12 milhões de hectares do Cerrado era cultivada com culturas anuais, sendo utilizados diversos sistemas de preparo do solo, com predomínio de uso de grade pesada e de arado de discos, além de arado de aivecas e escarificador. A lavoura comercial e a formação de pastagens plantadas são as principais atividades econômicas na região (ADUAN; VILELA; KLINK, 2003). As maiores culturas são soja (exportação), milho, arroz, feijão, cana e algodão (mercado interno). As fazendas da região são caracterizadas por grandes unidades monocultoras com entradas externas e mecanização pesada (CADAVID GARCIA, 1995; KLINK et al., 1995 *apud* BUSTAMANTE et al., 2006).

As técnicas de cultivo da denominada ‘Revolução Verde’ estão pautadas na limpeza do solo, aração e uso de agroquímicos, deixando a superfície do solo exposta. Já a técnica do plantio direto, na qual restos vegetais e da palhada são deixados na superfície do solo com recobrimento pacial, é uma opção viável para a preservação e aumento do carbono no solo.

Portanto, as taxas de acúmulo de C em solos tropicais sob sistema de plantio direto podem ser inclusive superiores àquelas verificadas em solos de regiões de clima temperado e isso pode representar um importante aspecto quanto ao potencial de melhoria da qualidade química, física e biológica de solos tropicais sob cultivo. Este acúmulo de C orgânico no solo representa uma retenção do $CO_2$ atmosférico no solo, o qual tem implicações positivas quanto à mitigação das taxas de crescimento das concentrações deste gás de efeito estufa na atmosfera. Portanto, como decorrência do efeito diferenciado dos sistemas de preparo sobre a dinâmica da matéria orgânica em função da textura e mineralogia do solo, das condições climáticas e das quantidades de resíduos vegetais que os sistemas de cultura adicionam ao solo, ocorrem taxas variadas de acúmulo líquido de C nos solos em plantio direto.

### *1.1.3. Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo – MO Lábil e MO Estável*

A gênese da matéria orgânica do solo está relacionada com a capacidade de seqüestro de carbono pelo solo que consiste na remoção líquida do dióxido de carbono ($CO_2$) da atmosfera para os reservatórios tais como vegetação e solo (LAL, 2003). O $CO_2$ é assimilado pelas plantas no processo de fotossíntese que transforma esse gás, na presença de água e de minerais, em biomassa vegetal. Em média, 58% desta biomassa é carbono (C) que compõem as folhas, caules, frutos e raízes. Os resíduos de plantas e animais constituem os precursores da matéria orgânica do solo (MOS). A decomposição de resíduos de plantas e animais no solo constitui o processo biológico básico no qual o C é reciclado para a atmosfera como $CO_2$, o nitrogênio torna-se disponível como amônio e nitrato, e outros elementos associados aparecem em formas assimiláveis pelas plantas.

Nesse processo, parte dos 4% do carbono orgânico total que constitui o componente vivo da MOS é incorporado à biomassa microbiana do solo (de 2,4% a 3,2% do C orgânico total do substrato pode ser utilizado pelos microorganismos para a síntese de células) e parte é convertida em húmus estável. Ao mesmo tempo, parte do húmus nativo é mineralizada. Em conseqüência, o conteúdo total de MOS é mantido em estado de equilíbrio característico do solo e do sistema de manejo aplicado (RESCK, 2005) (Figura 3).

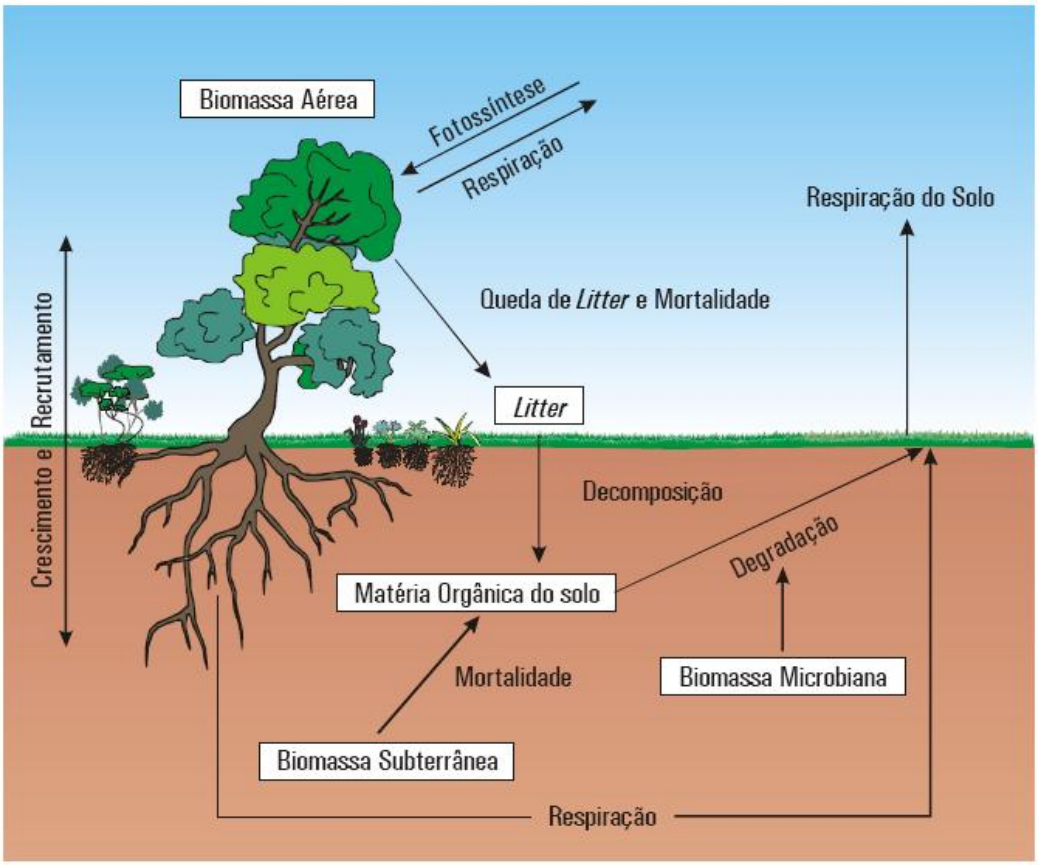



**Figura 3:** Representação dos principais estoques e fluxos do ciclo de carbono no solo.
Fonte: Aduan; Vilela; Klink (2003, p. 11)

A estabilização do C no solo depende de vários fatores incluindo o clima, a quantidade e qualidade de resíduos de plantas, os fatores que afetam a atividade microbiana e os atributos do solo que protegem a MOS, como a estrutura, textura e composição mineralógica do solo. Apesar da importância desses fatores, ainda são necessárias, para estimar o seqüestro de C no

solo, informações quantitativas sobre o tamanho dos vários reservatórios e taxas de *turnove*r (LUDWIG et al., 2003).

Para descrever a localização da MOS no solo, Duxbury, Smith e Doran (1989) apresentaram um modelo com quatro compartimentos: (1) o reservatório BIO (biomassa microbiana), constituído pela fauna e flora microbiana do solo sendo a sua persistência em solos tropicais é curta (0,25 anos); (2) o reservatório LAB (lábil), formado de materiais lábeis, ou seja, aqueles imediatamente disponíveis para a decomposição por ataque microbiano, como folhas, caules, raízes, frutos, resto de animais sendo o tempo de residência nos solos tropicais de 5 anos; (3) o reservatório POM que é a MO fisicamente protegida pela estrutura do solo; e (4) o reservatório COM que corresponde a MO quimicamente protegida pois possuem mecanismos de proteção contra a decomposição microbiana, o que acarreta, consequentemente, um tempo de residência no solo maior que os anteriores – entre 25 e 100 anos e 100 e 3.500 anos, respectivamente.

Segundo os autores, as interações estruturais ou intra-agregados como, por exemplo, o alojamento dos constituintes orgânicos dentro dos agregados do solo, produz uma estabilidade intermediária, criando condições para o estabelecimento da fração física ou estruturalmente protegida (POM). Concomitantemente, a natureza dos compostos orgânicos e as interações coloidais ou moleculares entre compostos orgânicos e minerais estabilizam os componentes orgânicos mais antigos, tornando-os mais protegidos (COM). O tamanho desses reservatórios é controlado por diferentes fatores: o POM é controlado pela ação mecânica de preparo e perturbação do solo enquanto que o COM pela adsorção às argilas do solo.

Esse modelo fornece a descrição dos compartimentos (estrutura) onde está localizada a MOS. No entanto, Jenkinson e Rayner (1977) desenvolveram um modelo funcional que descreve quatro compartimentos ativos onde o carbono orgânico do solo (COS) é distribuído e uma pequena quantidade de matéria orgânica permanece inerte (IMO). Os quatro compartimentos ativos são: Material Vegetal Decomponível (DPM; meia-vida de 0,165 anos); Material Vegetal Resistente (RPM; 2,31 anos); Biomassa Microbiana (BIO; 1,69 anos) e Matéria Orgânica Humificada (HUM), que pode ser dividida em MOS fisicamente protegida e estabilizada (POM; 49,5 anos) e MOS quimicamente protegida e estabilizada (COM; 1.980 anos).

A conversão de sistemas naturais para o agrícola envolve um elenco de atividades que afetam as taxas de adição e decomposição da MOS que é especialmente acelerada pela perturbação física com implementos no preparo do solo, a qual quebra os macroagregados (>0,25 mm) e expõe o solo antes protegido do processo de decomposição microbiana (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; TISDALL, 1996). A MOS livre, ou não oclusa nos agregados, é facilmente oxidada pelos microorganismos com o cultivo do solo (BESNARD et al., 1996). A contínua perturbação da MOS é refletida no aumento da emissão de $CO_2$. Por outro lado, a conversão de preparo de solo com arados para um preparo mínimo como o escarificador ou plantio direto pode resultar em seqüestro de COS e melhoria da qualidade do solo (LAL et al., 1998).

O estudo da dinâmica da MOS em sistemas agrícolas é especialmente importante para encontrar subsídios para a sustentabilidade agrícola, sendo que a manutenção ou até mesmo o aumento do estoque de carbono orgânico do solo (COS), conhecido como seqüestro de carbono no solo (SISTI et al., 2004; URQUIAGA et al., 2005), contribui para a manutenção da fertilidade, reduzindo a pressão do desmatamento de áreas para a expansão agrícola, que

acarreta significativas emissões de $CO_2$ derivado da biomassa florestal para a atmosfera.

Nos solos tropicais, a MOS tem uma importância extremamente relevante, visto que é responsável por diversas propriedades químicas, físicas e biológicas, que em seu conjunto determinam o grau de fertilidade ou a capacidade do solo de fornecer as condições necessárias para o adequado crescimento das culturas agrícolas. Assim, o teor e a qualidade da MOS são considerados como componentes chaves para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. O carbono é o principal componente da MOS, por isso o conhecimento da sua dinâmica no sistema solo-planta contribui para o entendimento de como os sistemas agrícolas podem afetar a quantidade e qualidade da MOS.

O conteúdo da MOS é basicamente o resultado da adição e decomposição de resíduos vegetais que chegam ao solo, sendo que a taxa de decomposição dos resíduos no solo é resultado tanto das características intrínsecas destes materiais, como extrínsecas a estes, como a interação com a fração mineral e biológica do solo. Assim, a soma destes fatores implicará em maior ou menor acumulação de MOS.

### *1.1.4. Técnica do Isótopo Estável $^{13}C$ nos Estudos da Dinâmica do Carbono*

O emprego do isótopo estável $^{13}C$ nos estudos da dinâmica do carbono (C) é uma importante técnica, permitindo uma melhor avaliação do impacto na matéria orgânica do solo (MOS) provocado pela conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas.

Na natureza existem dois isótopos estáveis de C, o $^{12}C$ que é o mais leve e apresenta a maior proporção no C total existente na natureza (98,89%), enquanto o $^{13}C$ representa apenas 1,11%.

Estas proporções se mantêm relativamente estáveis em qualquer resíduo orgânico. No processo de mudança de um estado físico-químico para outro, os isótopos de C sofrem uma diferença nesta proporção, o que só foi possível identificar com o advento de espectrômetros de massas mais sensíveis. O processo consiste em um fracionamento isotópico pela discriminação entre os dois isótopos de acordo com o processo de transformação, ou seja, um deles é preferencialmente perdido ou incorporado, em relação ao outro. Isso faz com que ocorra uma variação na proporção de $^{13}C$ /$^{12}C$, muito pequena, na casa dos milésimos.

Para avaliar essa modificação na proporção de $^{13}C$ /$^{12}C$ em uma amostra foi adotado como referência um padrão internacional. Este padrão é uma rocha calcária dolomítica (Belemnita) encontrada em uma formação geológica denominada *Pee Dee*, na Carolina do Norte, EUA, que tem razões isotópicas $^{13}C/^{12}C$ (R) constante de 0,01124. Os desvios da proporção de $^{13}C/^{12}C$ em relação ao padrão são conhecidos como δ (letra grega delta minúscula), e como essas diferenças são valores muito pequenos convencionou-se expressá-los em partes por mil (‰). As razões isotópicas $^{13}C$ /$^{12}C$ do $CO_2$ atmosférico e das plantas são inferiores ao padrão *PDB*, e por isso, seus valores de $\delta^{13}C$ são negativos. No caso do $CO_2$ atmosférico, os valores observados são próximos de -7 ‰ *PDB*, e das plantas, valores que variam de -11 a -35 ‰ *PDB* (FARQUHAR; EHLERINGER; HUBICK, 1989).

A aplicação da técnica de abundância natural de $^{13}C$ nos estudos da dinâmica da MOS utiliza a diferença na relação dos isótopos de C que existe nos diferentes grupos de plantas. As maiores diferenças na composição isotópica de C nos tecidos vegetais são observadas entre espécies que tem ciclo de carboxilação $C_3$ e ciclo $C_4$. As plantas de ciclo $C_3$ (ou de Calvin) fixam o $CO_2$ atmosférico através da enzima RUBISCO (*Ribulose bifosfato carboxilase/oxigenase*), enquanto as $C_4$ contam com o processo enzimático adicional de

fixação de $CO_2$ da enzima PEP *carboxilase* (*fosfoenolpiruvato carboxilase*). A PEP carboxilase apresenta alta afinidade (baixo Km) pelo $CO_2$, enquanto na RUBISCO esta afinidade pelo $CO_2$ é menor (MAGALHÃES, 1985). Em função disto, as plantas $C_3$ acumulam menos $^{13}C$, o isótopo pesado de carbono, em relação ao isótopo leve $^{12}C$, do que as plantas $C_4$ (*PEP carboxilase*).

A discriminação desse processo para diversos grupos de plantas foi apresentada no estudo realizado por Smith e Epstein (1971). Segundo eles, uma significativa discriminação isotópica ocorria com intensidades diferentes entre plantas de ciclo fotossintético $C_3$ e $C_4$, as quais foram separadas em diferentes grupos (*Monocolyledoneae, Algae, Dicolyledoneae, Briófitas e Gynnospermeae*). Plantas de ciclo $C_3$, como as dicotiledôneas, apresentam variações na abundância isotópica de $^{13}C$ de -20 a -34 ‰ *PDB* (média de -27 ‰ *PDB*). Grande parte das espécies florestais pertence a este grupo. As plantas de ciclo $C_4$, em sua maioria monocotiledônea, discriminam menos o $^{13}C$ e apresentam valores que variam de -9 a -17 ‰ *PDB* (média de -13 ‰ *PDB*). Assim, devido à diferença média de $\delta^{13}C$ entre espécies $C_3$ e $C_4$ é possível determinar a contribuição de cada uma na MOS. Isto é possível com o conhecimento da abundância natural de $^{13}C$ do resíduo das plantas, e da MOS, e a aplicação de modelos que permitam estimar a origem, composição e a dinâmica da MOS.

Portanto, nos estudos de dinâmica da MOS, a utilização das técnicas de abundância natural de $^{13}C$ é aplicada em situações onde o padrão fotossintético da vegetação original foi modificado e pressupõe que a matéria orgânica do solo reflete o material vegetal do qual foi originada. Vários estudos foram realizados para avaliar se o processo de decomposição poderia modificar a composição isotópica do C na MOS recém formada em relação àquela observada nos resíduos, o que poderia limitar o uso desta técnica. Porém, esses estudos mostraram que

na decomposição do resíduo vegetal no solo ocorre uma discriminação isotópica do $^{13}C$ que resulta numa leve alteração na marcação isotópica da MOS. O grau com que isso ocorre está relacionado com a composição de compostos como proteínas, açúcares, aminoácidos, lignina, celulose e hemicelulose dos resíduos (BENNER et al., 1987). No entanto, essa discriminação é pequena, e varia entre 1 e 2 ‰ *PDB* em relação ao resíduo (BALESDENT; MARIOTTI, 1987; MARTIN et al., 1990; JASTROW; BOUTTON; MILLER, 1996; TARRÉ et al., 2001).

### *1.1.5. O Solo Agrícola e o Mercado Internacional de Carbono*

O solo é um reservatório de C e o sistema de manejo é um fator que influencia vários processos determinantes dos fluxos de entrada e saída de C do solo (DIECKOW et al., 2004). A importância de compreender a relação entre o sistema de manejo do solo e o ciclo de C está relacionada, em primeiro lugar, ao fato de que o C é o elemento presente em maior concentração na matéria orgânica do solo (MOS), geralmente, 58%. Além disso, o C é um constituinte de importantes gases causadores do efeito estufa, como o $CO_2$ e $CH_4$ (DIECKOW et al., 2004). Os autores consideram que,

> Conhecendo melhor a relação entre o manejo do solo e o ciclo do C, é possível estabelecer sistemas de manejo que maximizem os fluxos de entrada e minimizem os fluxos de saída de C do solo. Isso é uma forma racional e eficiente de garantir tanto a produção de alimentos, através da melhoria da qualidade do solo, como a mitigação do efeito estufa, através do seqüestro de carbono (DIECKOW et al., 2004, p.7).

Estima-se que com o manejo, os solos agrícolas podem seqüestrar entre 0,4 e 0,9 Mg/ha/ano de C num período de 20 – 50 anos e com isso recuperar entre 50 e 66% da perda histórica de 78 Pg de C (LAL, 2004 *apud* DIECKOW et al., 2004). Cerri et al. (2000) *apud* Segnini et al. (2004) salientam que "através das atividades agrícolas e da mudança do uso do solo, seria possível retirar de 400 a 800 milhões de toneladas de C da atmosfera por ano".

Neste contexto, o sistema de plantio direto tem merecido relevante destaque entre os sistemas de manejo de solo, já que este não é revolvido, evitando a perda da MOS. Procura-se sempre manter o solo coberto por resíduos vegetais, com a finalidade de protegê-lo do impacto de gotas de chuva, do escorrimento superficial e das erosões.

Segnini et al. (2004) observaram que maior porcentagem de C foi encontrada em sistemas sob plantio direto, comparados com sistema sob cultivo mínimo e plantio convencional. Os autores notaram ainda que o C diminui à medida que a profundidade aumenta em todas as amostras. O plantio direto tem mostrado aumento da MOS, provavelmente, devido à maior quantidade de resíduos de plantas, contribuindo também para o aumento da capacidade deste em reter C por mais tempo (SEGNINI et al., 2004, p.2). O valor estimado de seqüestro de C para plantio direto nas regiões subtropicais (0,48 Mg/ha de C) e nas regiões tropicais (0,35 Mg/ha de C) do Brasil (BAYER, 2004 *apud* DIECKOW, 2004, p.14).

A agropecuária é, simultaneamente, fonte e dreno de gases de efeito estufa. De acordo com o 1º Inventário Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) de Minas Gerais, lançado em 2008 (Ano base 2005) pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente (SISEMA), por meio da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), são vários os processos que resultam em emissões de gases de efeito estufa – como o dióxido de carbono ($CO_2$), o metano ($CH_4$) e o óxido nitroso ($N_2O$) – na agricultura e na pecuária. A fermentação entérica dos animais ruminantes herbívoros é uma das maiores fontes de emissão de $CH_4$. Os sistemas de manejo de dejetos de animais podem causar emissões de $CH_4$ e $N_2O$. A queima de resíduos agrícolas, principalmente na cultura da cana-de-açúcar, produz emissões de $CH_4$ e $N_2O$. O $CO_2$ emitido, embora contabilizado, não é somado ao total de emissões porque por meio da fotossíntese a mesma quantidade foi absorvida durante o crescimento da planta. A emissão de $N_2O$ em solos

agrícolas decorre da aplicação de fertilizantes nitrogenados, tanto de origem sintética quanto orgânica, e da deposição de dejetos de animais em pastagens. Os resíduos vegetais deixados no campo, fonte de nitrogênio, e o processo de fixação biológica desse elemento são fontes de emissão de $N_2O$. Ainda nesse setor, enquadra-se o cultivo de solos orgânicos que aumenta a nitrificação da matéria orgânica e libera $N_2O$.

Enquanto fonte, as atividades agropecuárias poderão estar sujeitas, da mesma forma que os demais setores, à futuras limitações de emissões estabelecidas por legislações ambientais estaduais, nacionais, ou mesmo acordos internacionais, visando controlar o incremento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Por outro lado, enquanto dreno – processo no qual o dióxido de carbono é removido da atmosfera pela fotossíntese e armazenado na biota ou no solo na forma de matéria orgânica – poderá se beneficiar destas mesmas regulamentações sendo remunerada por este serviço ambiental (PAUSTIAN et al., 2004).

Nesse sentido, a agropecuária, hoje, passa por uma fase de transição, na qual adquire múltiplos propósitos. Além de produzir alimentos, a agricultura contemporânea deve ser uma fonte de energia renovável e, ainda, ser pouco poluidora e oferecer a opção de mitigar as emissões de GEE a um custo baixo (RICE; REED, 2007). Desse modo, a obtenção de elevados rendimentos de grãos não deve ser o único critério para avaliar o desempenho da atividade agrícola (FARAHBAKHSHAZAD et al., 2008). A preocupação com os impactos da agropecuária sobre os recursos naturais deve ser incluída no momento de seleção de práticas de manejo no processo produtivo (TILMAN et al., 2002).

A partir de sua grande expansão de área em meados do século XIX nos países industrializados e mais tarde nos países em desenvolvimento, a agricultura aumentou sua participação no total de emissões de origem antropogênica. Nesse processo, destaca-se o desmatamento, queimadas, avanço da mecanização agrícola, aumento do consumo de combustíveis fósseis, declínio do estoque de carbono no solo e o uso generalizado de agroquímicos e fertilizantes que demandam grandes gastos energéticos em seu processo de produção. Dessa forma, a agricultura produz, mundialmente, aproximadamente 5% das emissões antropogênicas de $CO_2$ e, 47 e 84% das emissões de $CH_4$ e $N_2O$, respectivamente (RICE, 2006).

No Brasil, as emissões de GEE pelo setor agrícola são relevantes, alcançando 75, 91 e 94% das emissões totais de $CO_2$, $CH_4$ e $N_2O$, respectivamente (CERRI; CERRI, 2007). Vale destacar que grande parte destes valores está associada ao desmatamento e queimadas. Os elevados valores de emissões evidenciam a necessidade do desenvolvimento de práticas de manejo agrícola que permitam uma redução das emissões de GEE e promovam o seqüestro de $CO_2$ atmosférico e seu armazenamento na biomassa vegetal e no solo.

Os solos agrícolas armazenam atualmente 46 Tg $CO_2$ equivalente/ano. O $CO_2$ equivalente é medida-padrão usada para avaliar a emissão ou seqüestro dos diferentes GEE, tendo como base o potencial de aquecimento global do $CO_2$ num período de 100 anos. Assim, 1 Mg $CH_4$ = 21 Mg $CO_2$ e 1 Mg $N_2O$ = 310 Mg $CO_2$. No entanto, com a adoção de práticas que incrementem o potencial de seqüestro de carbono, podem alcançar 200 Tg $CO_2$ equivalente/ano (RICE; REED, 2007). Análises econômicas sugerem que o seqüestro de carbono em solos agrícolas é uma das opções mais viáveis para reduzir as emissões de GEE, particularmente nos próximos 30 anos (CALDEIRA et al., 2004).

Contudo, os solos agrícolas têm uma capacidade finita de armazenar carbono, estimado de 20 a 30 anos e, portanto, não podem ser entendidos como uma solução definitiva para o aumento das concentrações de GEE na atmosfera (RICE; REED, 2007). A quantidade de carbono que pode ser armazenada no solo varia em função do clima – precipitação e temperatura, e das características pedogenéticas – principalmente os teores de argila e de óxidos de ferro e alumínio. O Brasil, em função de sua grande extensão territorial e clima favorável à fotossíntese durante a maior parte do ano, tem significativo potencial para atuarem como importantes drenos biológicos de carbono atmosférico. Mundialmente, estima-se que o setor agrícola pode compensar aproximadamente 11% das emissões atuais de GEE, enquanto que no Brasil este potencial pode alcançar 20 a 30% das emissões do país (BAYER, 2007).

O seqüestro biológico de carbono no solo, de um modo geral, pode ser alcançado por práticas de manejo que aumentem o aporte de carbono e diminuam as taxas de decomposição de matéria orgânica. As plantas absorvem $CO_2$ da atmosfera através do processo da fotossíntese. Parte deste carbono é liberado novamente para atmosfera através da respiração do agroecossistema (solo, planta e biota). Portanto, no sistema solo-planta-atmosfera, o carbono está constantemente sendo reciclado entre plantas em desenvolvimento, resíduos animais e vegetais mortos, biota do solo, matéria orgânica e atmosfera. O saldo líquido deste ciclo no último compartimento é o que interessa para as mudanças climáticas.

Segundo Smith et al. (2007) e Rice e Reed (2007), inúmeras são as práticas que podem ser empregadas para aumentar o influxo de carbono no solo em sistemas agrícolas. A tabela 1 apresenta valores médios de potencial de seqüestro de carbono por práticas agrícolas. Destaca-se que os valores podem variar em função do clima e condições do solo. Dentre as práticas apresentadas, destaca-se o potencial do plantio direto, por diminuir o consumo de

óleo diesel e aumentar o estoque de carbono no solo, em relação ao preparo convencional.

**Tabela 1:** Estimativa do potencial de seqüestro de carbono por práticas agrícolas.

| **Práticas de Manejo** | **Mg/ha/ano de C** | **Mg/ha/ano de $CO_2$** |
|---|---|---|
| Plantio Direto | 0,30 – 0,70 | 1,1 – 2,6 |
| Eliminação do pousio | 0,10 – 0,35 | 0,4 – 1,3 |
| Uso de culturas de cobertura | 0,10– 0,35 | 0,4 – 1,3 |
| Manejo de Pastagens | 0,03 – 0,07 | 0,1 – 0,3 |

Fonte: Amado et al. (2008) adaptado de Rice e Reed (2007).

Diante disso, constata-se que a agropecuária tem um conjunto de opções para contribuir com o controle dos GEE, ao mesmo tempo que mantém sua principal atividade fim, qualificando-a deste modo como uma opção viável para o mercado de carbono.

Nos últimos anos, o crescente interesse da sociedade pelo seqüestro de carbono no solo tem motivações ambientais e econômicas (PENDELL et al., 2006). A motivação econômica pelo seqüestro de carbono reside no fato de que ela pode representar uma renda extra aos agricultores e estimular o emergente mercado de créditos de carbono. O crédito de carbono pode ser definido como uma tonelada (1Mg) de carbono permanente ou temporariamente armazenada no solo ou na biota, ou ainda emissões de GEE, expressas em $CO_2$ equivalente, que foram evitadas por alterações induzidas nas práticas de manejo agrícola. Atualmente, existem dois tipos de mercado de carbono: o obrigatório ou regulatório e o voluntário. O primeiro estabelece um limite mínimo pré-definido de redução, como o verificado no Protocolo de Quioto. Neste caso, países do Anexo I (industrializados) podem alcançar o valor pré-estabelecido por reduções de emissões ou por aquisição de créditos de países que estão no Anexo II (não industrializados) e que desenvolvam projetos de seqüestro de $CO_2$ atmosférico.

No mercado de carbono um dos aspectos mais questionados é se realmente os créditos comercializados estão promovendo uma melhoria ambiental. Neste contexto, para obter mais sucesso, os programas de controle de aquisição de créditos de GEE deveriam apresentar um balanço completo de GEE, apresentar ações de observância ou conferência, propor metas de mitigações de GEE compostas por estratégias que combinem ações temporárias e permanentes de seqüestro de carbono, adotar práticas de manejo em larga escala, implantar procedimentos e protocolos para monitorar e verificar as mudanças no estoque de carbono no solo e avaliar as reduções de emissões de GEE através de práticas agrícolas.

No entanto, os benefícios ambientais de mitigação das emissões de gases do efeito estufa pela agricultura são dependentes da adoção massiva pelos agricultores de práticas de manejo que favoreçam o incremento do teor de matéria orgânica. Os experimentos de longa duração de manejo do solo têm sido ferramentas importantes para a seleção das práticas agrícolas eficientes em seqüestrar carbono. Entre essas práticas destaca-se: sistema de plantio direto, ausência de pousios, uso de culturas de cobertura, uso de pastagens, rotação de culturas, práticas de controle da erosão, melhoria no manejo da adubação nitrogenada mineral, incremento da agregação e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo.

O valor econômico de um dreno de carbono é proporcional à sua capacidade total de acúmulo de carbono e ao risco de reversibilidade deste processo. Depende ainda da sua relação custo/benefício. O beneficio pela diminuição da emissão de GEE por unidade de área pode ser expresso na mesma unidade, independente da fonte (drenos agrícolas, conservação de energia ou diminuição de emissões de GEE). Neste caso, o custo da diminuição da emissão de GEE pode ser bastante variável de acordo com a fonte.

O seqüestro de carbono em solos agrícolas, embora seja um dreno finito, temporário e reversível, apresenta as vantagens de ter um dos menores custos para a sua implementação em relação às demais opções, e um potencial de retirada de um grande volume de $CO_2$ atmosférico, desde que seja adotado em larga escala pelos agricultores. Além disso, as práticas de manejo recomendadas para o seqüestro de carbono são complementares à atividade fim (produção agrícola), podendo inclusive potencializá-la. Porém, a efetiva contribuição da agricultura para o seqüestro de carbono está associada ao preço de remuneração do carbono. Smith et al. (2007) estimam que a um preço de U$20/Mg de $CO_2$ equivalente, 30% do potencial seria alcançado. Já com um preço de U$100/Mg de $CO_2$ equivalente, 75% do potencial técnico seria alcançado. Assim, o valor do carbono pode regular a adoção de práticas de incremento do seqüestro de carbono na agricultura (RICE; REED, 2007).

A análise econômica que determina os custos de seqüestrar carbono depende das características do local, da quantidade de carbono seqüestrada, preço da terra, práticas de manejo selecionadas, tipo de solo e clima. Feng et al. (2004) encontraram custos variando de U$ 10 a 800/Mg de C. Nesse sentido, foi estimado por Willians, Roth e Claassen (2004) que o pagamento necessário para induzir os produtores a adotarem plantio direto em substituição ao preparo convencional, por exemplo, seria de U$ 8,62 a 64,64/Mg/ano de C. Desse modo, os custos para implementação do sistema de plantio direto e outras práticas associadas é o mais viável economicamente para promover o seqüestro biológico de carbono em solos (PENDELL et al., 2006).

O seqüestro de carbono no solo pode ser definido como uma estratégia de benefício mútuo para a agricultura e para políticas de controle das mudanças climáticas. O aumento do estoque

de carbono no solo pode contribuir para melhorar a qualidade do solo, incrementar a fertilidade e a produtividade, controlar a erosão e reduzir a perda de nutrientes, aumentar a capacidade do solo em armazenar água e consequentemente diminuir os efeitos negativos dos déficits hídricos de curta duração, reduzir a lixiviação de nutrientes e melhorar a qualidade da água da superfície e subsuperfície e, ainda, pode contribuir para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e o uso de agroquímicos.

Deste modo, nenhuma outra opção de redução de GEE oferece tanto benefícios adicionais para sociedade quanto o seqüestro de carbono no solo agrícola. Estimativas indicam que o potencial de créditos de mercado de carbono para a agricultura americana é de U$ 1 a 5 bilhões por ano nos próximos 30 a 40 anos. O mercado de carbono ainda encontra-se em uma fase emergente, com o estabelecimento da *Chicago Climate Exchange* (*CCX*) e de vários outros projetos e/ou programas de mitigação de GEE.

## 1.2. A Introdução de Pastagens Cultivadas no Cerrado: Alterações no Estoque de Carbono no Solo

As pastagens cobrem cerca de dois terços de toda a área agricultável do globo terrestre. No Brasil, as pastagens ocupam cerca de três quartos da área agrícola nacional (BRASIL, 2006 *apud* PAULINO; TEIXEIRA, 2009), o que corresponde a cerca de 210 milhões de hectares, assumindo posição de destaque no cenário agrícola brasileiro. Até a década de 1970, as pastagens nativas respondiam pela maior proporção da área total de pastagens no Brasil. Entretanto, nas décadas de 1970 e 1980, a área ocupada por cultivares de plantas forrageiras aumentou de maneira significativa. Atualmente, segundo Martha Júnior e Vilela (2002), estima-se que a área total de pastagens cultivadas nos estados cobertos pelo bioma Cerrado esteja ao redor de 54 milhões de hectares dos quais cerca de 50% são representados por espécies forrageiras cultivadas (Tabela 2), principalmente, por plantas do gênero *Brachiaria* (Tabela 3).

**Tabela 2:** Área – hectares, ocupada pelas diferentes classes de uso da terra nos estados cobertos pelo Bioma Cerrado.
(ano-base: 2002; área total do Cerrado: 204,7 milhões de hectares)

| Estado | Cerrado[1] (%) | Cultura agrícola | Pastagem cultivada | Reflorestamento | Área urbana | Área com mineração | Total | Uso da terra (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PI | 37 | 215.265 | 521.731 | 1.379 | 20.933 | 0 | 759.307 | 8 |
| MA | 65 | 356.028 | 1.901.655 | 27.171 | 35.876 | 0 | 2.320.731 | 11 |
| TO | 91 | 175.565 | 4.253.134 | 376.645 | 36.350 | 2.406 | 4.844.100 | 19 |
| BA | 27 | 1.572.701 | 2.257.253 | 125.869 | 11.892 | 0 | 3.967.715 | 26 |
| MT | 40 | 5.561.053 | 6.508.944 | 31.974 | 64.268 | 3.289 | 12.169.529 | 34 |
| MG | 57 | 2.122.452 | 11.838.147 | 1.302.344 | 171.832 | 1.889 | 15.436.664 | 46 |
| GO | 97 | 5.037.522 | 12.931.552 | 50.514 | 182.089 | 0 | 18.201.676 | 55 |
| DF | 100 | 137.455 | 119.749 | 3.504 | 101.853 | 0 | 362.561 | 62 |
| MS | 61 | 2.712.019 | 10.948.449 | 1.017.755 | 61.630 | 73 | 14.739.925 | 68 |
| PR | 2 | 83.534 | 103.739 | 66.697 | 1.892 | 0 | 255.863 | 68 |
| SP | 33 | 3.585.977 | 2.622.416 | 533.236 | 200.445 | 213 | 6.942.286 | 85 |
| Total | | 21.559.571 | 54.006.770 | 3.537.088 | 889.059 | 7.870 | 80.000.357 | 39 |

[1]Percentagem do estado coberto pelo Bioma Cerrado.

Fonte: Sano et al. (2008)

**Tabela 3:** Estimativa da distribuição relativa dos principais gêneros e espécies de gramíneas forrageiras cultivadas na região do Cerrado do Brasil.

| Gênero ou Espécie | Área ($10^3$ ha) | Distribuição relativa (%) |
|---|---|---|
| ***Brachiaria spp.*** | 42,5 | 85 |
| *B. decumbens* cv. Basilisk | 27,5 | 55 |
| *B. brizantha* cv. Marandu | 10,5 | 21 |
| *B. humidicola* cv. comum | 4,0 | 8 |
| *B. ruziziensis* cv. comum, *B. dictyoneura* cv. comum | 0,5 | 1 |
| ***Panicum maximum*** | 5,5 | 11 |
| *P. maximum* cv. Colonião comum | 3,5 | 7 |
| *P. maximum* cv. Tanzânia, Tobiatã, Mombaça etc. | 2,0 | 4 |
| **Outros gêneros** | 2,0 | 4 |
| *Andropogon, Hyparrheria, Melinis, Cynodon* | | |
| **Total** | **50,0** | **100** |

Fonte: Zimmer et al. (1998) adaptado por Macedo (2000)

No Cerrado, a introdução de cultivares de plantas forrageiras selecionadas, em comparação com as plantas formadas por espécies nativas, permitiu ganhos expressivos na taxa de lotação animal, que corresponde ao número de animais por unidade de área de toda a unidade de pastejo para um dado período de tempo (FGTC, 1992), no desempenho e na produtividade animal (Figura 4). Esses resultados, associados aos significativos investimentos do governo em infra-estrutura e programas de desenvolvimento para ocupar as pastagens e a seleção de plantas forrageiras adaptadas às condições edafoclimáticas da região, nortearam a tomada de decisão dos produtores, quer visaram implantar pastagens com essas cultivares em larga escala em suas propriedades (MARTHA JÚNIOR; VILELA, 2002).

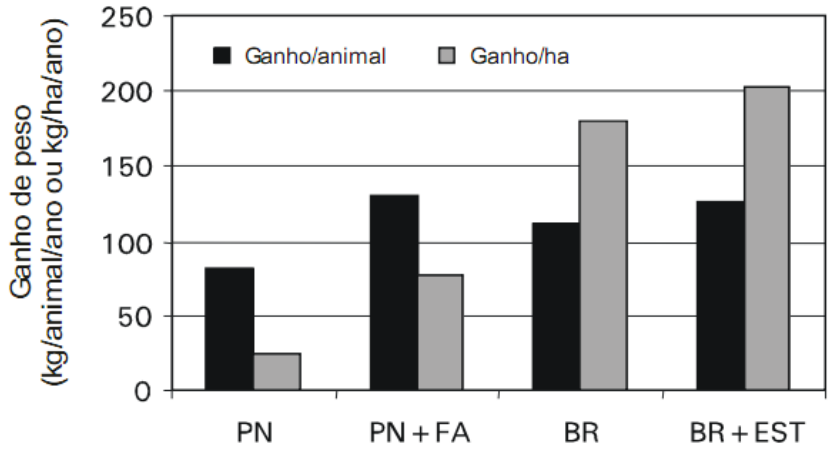



**Figura 4:** Ganho por animal (Kg/animal/ano) e por área (Kg/ha/ano) em pastagens nativas e cultivadas no Cerrado.
PN – Pastagem nativa; FA – Faixa de Andropogon; BR – *Brachiaria ruzizienses*; EST – Estilosantes.
Fonte: Zoby et al. (1987)

Assim em menos de três décadas, o Cerrado transformou-se na principal área de produção de carne bovina do Brasil (MARTHA JÚNIOR; VILELA; 2002). Atualmente, a região do Cerrado, com 54 milhões de hectares de pastagem cultivada (SANO et al., 2008), detém 41% do rebanho bovino nacional (EMBRAPA CERRADOS, 1999) e responde por cerca de 55% da produção de carne bovina do país (MACEDO, 2000). Em outros países da América do Sul, como a Colômbia e a Venezuela, a região de savanas também responde por importante parte da produção de gado de corte (MACEDO, 1997).

No entanto, mesmo com essa melhora na capacidade de suporte e na produtividade dos sistemas de produção animal em pastejo, comumente observa-se que esses empreendimentos operam com baixas produtividades (kg de carne ou leite/ha/ano) e rentabilidades (R$/ha). Essas baixas produtividades e rentabilidades podem ser explicadas pelo gerenciamento deficiente do empreendimento (BOIN, 1998) e pelo manejo inadequado do sistema solo-planta forrageira-animal em pastejo (MARTHA JÚNIOR; CORSI; 2001) que geralmente determinam a degradação da pastagem.

Segundo Paulino e Teixeira (2009), cerca de 70% das regiões desmatadas no Brasil são para abertura de novas pastagens. O desmatamento, além de ser uma das mais importantes fontes de carbono para a atmosfera, é uma grave ameaça à nossa biodiversidade e aos nossos recursos hídricos. A formação de pastos, sem nenhum conhecimento agronômico e de manejo dos animais, pode ser produtiva nos primeiros anos após o estabelecimento, mas, dois a três anos depois, perde sua produtividade, o que leva à abertura de mais áreas, contribuindo assim para o desmatamento.

Atualmente, o declínio da produtividade das pastagens com o tempo constitui o maior obstáculo para o estabelecimento de uma pecuária bovina sustentável em termos agronômicos, econômicos e ambientais no Cerrado (MARTHA JÚNIOR; VILELA, 2002).

A degradação das pastagens pode ser definida como:

> um processo evolutivo de perda de vigor, de produtividade e de capacidade de recuperação natural das pastagens para sustentar os níveis de produção e qualidade exigida pelos animais, assim como o de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras, culminando com a degradação avançada dos recursos naturais, em razão de manejos inadequados (MACEDO, 1995).

A degradação das pastagens, na região do Cerrado, é particularmente evidente quando se considera a abrangência desse processo, haja vista que algumas estimativas indicaram que entre 50% e 80% das áreas ocupadas com pastagens cultivadas, nessa região, apresentam algum grau de degradação (VIEIRA; KICHEL; 1995; BARCELLOS, 1996).

Esta versão de degradação está baseada num processo contínuo de alterações da pastagem que tem início com a queda do vigor e da produtividade da pastagem. Poder-se-ia comparar este processo a uma escada (Figura 5), na qual no topo estariam as maiores produtividades e, à

medida que se descem os degraus com a utilização da pastagem, avança-se no processo de degradação. Até um determinado ponto, ou um certo degrau, haveria condições de se conter a queda de produção e manter a produtividade através de ações mais simples, diretas e com menores custos operacionais. A partir desse ponto, passar-se-ia para o processo propriamente de degradação, em que só ações de recuperação ou de renovação, muitas vezes mais drásticas e dispendiosas apresentariam respostas adequadas. O final do processo culminaria com a ruptura dos recursos naturais, representado pela degradação do solo com alterações em sua estrutura, evidenciadas pela compactação e a conseqüente diminuição das taxas de infiltração e capacidade de retenção da água, causando erosão e assoreamento das nascentes de lagos e rios (MACEDO, 1999).

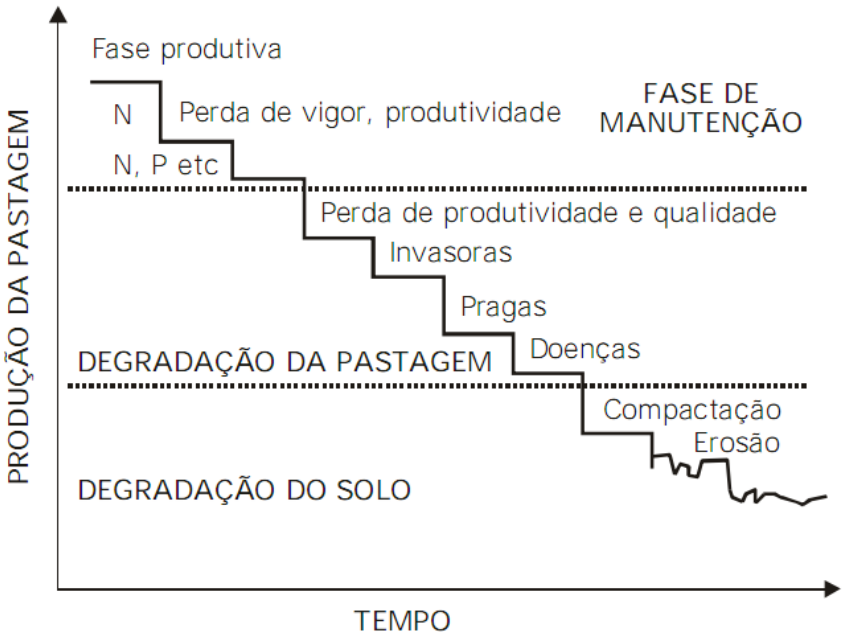



**Figura 5:** Representação esquemática do processo de degradação de pastagens em suas diferentes etapas no tempo.
Fonte: Macedo (2000)

Esse cenário de degradação das pastagens é preocupante e deve servir de estímulo ao desenvolvimento de alternativas rentáveis e sustentáveis para a produção de bovinos em pastejo. Na verdade, essa assertiva reveste-se de importância tendo em vista que o panorama

pecuário na Região do Cerrado pode ser alterado rapidamente, uma vez que a recuperação ou renovação da área de pastagem degradada oferece oportunidades para a adoção de tecnologias com potencial para modificar significativamente a produtividade, lucratividade e sustentabilidade desses empreendimentos pecuários (BARCELLOS, 1996).

O estabelecimento inadequado da espécie forrageira na área; o manejo inadequado da pastagem; a correção inadequada da fertilidade do solo no momento do estabelecimento da pastagem; e a falta de cuidados para com a manutenção e reposição da fertilidade do solo em pastagens estabelecidas são os fatores responsáveis pela produtividade e sustentabilidade da pastagem, sendo importantes e indispensáveis para o sucesso dos empreendimentos de pecuária no Cerrado.

Além da redução na produtividade, a degradação da pastagem faz com que haja perda de matéria orgânica do solo e emissão de $CO_2$ para atmosfera, com redução no seqüestro do carbono em solos sob pastagem. O ecossistema pastagem, com manejo adequado, tem recebido destaque por seu papel no combate ao aumento do efeito estufa, ao atuar em favor do seqüestro de carbono. A condição de fertilidade do solo afeta a produção de biomassa aérea e radicular, que por sua vez afeta diretamente a quantidade de resíduos depositados no solo e conseqüentemente o seqüestro de C (PAULINO; TEIXEIRA, 2009).

O manejo de pastagem tem sido citado como a segunda mais importante prática agrícola disponível para a mitigação das mudanças climáticas globais (FAO, 2009). A quantidade de carbono estocado nas pastagens é de, pelo menos, 10% do carbono global (ESWARAN et al., 1993 *apud* SCURLOCK; HALL, 1998), embora algumas fontes estimassem cerca de 30% (ANDERSON, 1991 *apud* SCURLOCK; HALL, 1998; FAO, 2009).

FAO (2009) apontou que algumas melhorias no manejo das pastagens incluem restauração da matéria orgânica dos solos, redução da erosão e decréscimo nas perdas resultantes pelas queimadas e sobrepastejo, dentre outros fatores, que incluem,

> The capacity to sequester carbon depends on the climatic zone, the past history and status of the land resources such as soil and vegetation, and the opportunities available to change management practices (management techniques, competition, with other land uses, economic tradeoffs, land tenure, social organization, incentives and political will) (FAO, 2009, p.3).

Pesquisas realizadas pela EMBRAPA Agrobiologia, em regiões da Mata Atlântica e Cerrado, mostraram que, em ambas regiões, se as pastagens forem mantidas produtivas, o solo sob pastagens pode acumular mais C do que está presente no solo sob a mata nativa (EMBRAPA, 2004).

As práticas de manejo do solo podem causar diferenças nas taxas de mineralização da matéria orgânica. Mudanças no C do solo das pastagens podem ocorrer em função do manejo, além de fatores ambientais, como, por exemplo, pastejo, fogo, fertilização, além da conversão das pastagens em cultura. Processos erosivos podem ocasionar perda de C no solo das pastagens pela redução da produtividade do solo erodido, aumentando-o, nas áreas deposicionais, ocorrendo uma redistribuição do C do solo como resultado da erosão (FAO, 2009).

Muito se discute sobre os efeitos negativos da pecuária em relação à emissão de gases de efeito estufa. Estudos realizados em diversas partes do mundo estimaram que as práticas de manejo da fertilidade do solo em pastagens podem aumentar de 50 a 150 kg/hectare a quantidade de carbono seqüestrada. Por outro lado, a ausência de N e a utilização menos freqüente da pastagem resultaram em perda para a atmosfera de 57 $g/m^2$ de C por ano. Os autores concluíram que a conversão de terras aráveis em pastagens perenes teve efeito

positivo sobre o balanço de C no sistema, embora o efeito tenha sido mais pronunciado nos três primeiros anos após a conversão. A redução no uso de fertilizantes como a lotação animal reduziu as emissões de $CH_4$ e $N_2O$ por unidade de área. Entretanto, este tipo de estratégia diminuiu o potencial de seqüestro de C pelo solo. Esses resultados fortalecem a hipótese de que o aumento das emissões prejudiciais de $CH_4$ e $N_2O$ é freqüentemente compensado pelo seqüestro de C no solo.

Estimativas apontam que as pastagens brasileiras seqüestram cerca de 920 kg/ha/ano. Considerando a eficiência de pastejo, os conteúdos de carbono na matéria seca e o estoque de carbono no solo, grosseiramente eleva-se na ordem de 1,2 a 2,1 toneladas de carbono seqüestrado por unidade animal acrescentada na lotação por área (PAULINO; TEIXEIRA, 2009).

Os valores padrões de produção de metano por um bovino adulto pastejando em condições normais, podem variar de 40 a 70 kg/animal/ano, o que equivale a 0,92 a 1,61 t/animal/ano de $CO_2$ equivalente. No entanto, a expectativa de fixação de $CO_2$ proveniente da atmosfera pelas plantas forrageiras são bem maiores, considerando o potencial de produção de matéria seca das plantas de clima tropical. Pedreira e Primavesi (2008) fizeram uma simulação do balanço dos gases gerados em um sistema de produção de bovinos em pastejo pode ser visualizada na Tabela 4.

**Tabela 4:** Emissão de metano ($CH_4$) e dióxido de carbono ($CO_2$) por bovinos adultos consumindo forragem e sal mineral e sequestro de $CO_2$ em pasto bem manejado com *Brachiaria*.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Bovino adulto | | | | | |
| Emissão de $CH_4$ | 60,5 kg/ano[1] | Equivalente $CO_2$ | | 60,5 x 23 = | 1.391 |
| Emissão de $CO_2$ | 54,0 kg/ano | | | + | 54 |
| | | TOTAL Eq. $CO_2$ | | = | 1.445 |
| Pastagens | | | | | |
| Seqüestro de $CO_2$ | 60.000 kg/ha/ano[2] | Considerando animais/ha | 0,95 | = | 63.157 |
| | | BALANÇO | | = | - 61.712 |

Fonte: Dados adaptados de Pedreira e Primavesi (2008)

Recuperar uma pastagem degradada e torná-la uma pastagem bem manejada, representa vantagem no aspecto de retirada de $CO_2$ atmosférico. Portanto, a exploração da atividade pecuária praticada de forma racional é uma ferramenta benéfica ao seqüestro de carbono. Evidentemente que a produção de $CO_2$ equivalente pode variar em função, por exemplo, do uso de fogo e também da decomposição dos dejetos dos animais.

O sequestro de C pelos solos é o mecanismo que detém o maior potencial de mitigação no setor agrícola (IPCC, 2007). Globalmente, os pastos estocam 8% do C do mundo (IPCC, 2001 *apud* FAO, 2009). Segundo Conant e Paustian (2002) *apud* FAO (2009), a média geral de capacidade de sequestro de carbono pela pastagem é de, aproximadamente, 45,7 Tg C por ano.

A pastagem de *Brachiaria* acumula 0,92 t/ha/ano de carbono. Portanto, o estabelecimento de pastagens cultivadas podem resultar num aumento da taxa de sequestro de carbono pelo solo. Porém, a correção parcial ou não-correção da fertilidade do solo, a falta de adubação de manutenção e o excesso de lotação com sistemas inadequados de pastejo tem sido um procedimento padrão no Cerrado, levando a um estágio de degradação das pastagens

cultivadas, o que pode comprometer a capacidade das pastagens em sequestrar carbono (EMBRAPA, 2005).

Sobre as pastagens cultivadas, Silva et al. (2004) avaliaram que,

> Most of the cultivated pastures were experiencing some degree of degradation, which means that they had lost, to some extent, their capacity to produce biomass due to the deterioration of soil chemical conditions (increasing acidity, low fertility and low nitrogen inputs), as well as soil physical and biological conditions (SILVA et al., 2004, p. 357).

Sobre esse aspecto, Silva et al. (2004) analisaram os seguintes tipos de pastagens (Tabela 5): (1) Pastagem nativa, (2) *Panicum maximum*, (3) *Brachiaria decumbens*, (4) *B. decumbens* + *Slylosanthes guianensis*, (5), *Andropogon gayanus* + *Neonotoniawightii* + *Centrosema brasilianum*, (6) dois campos de produção de sementes, *B. brizantha* e (7) *Paspalum atratum*.

**Tabela 5:** Acúmulo de C (Mg/ha) em solos sob diferentes pastagens.

| Profundidade (cm) | Nativa (1) | *P. maximum* (2) | *B. decumbens* (3) | *B. brizantha* + *legumes* (4) | *A. gayanus* + *legumes* (5) | *B. brizantha* (6) | *P. atratum* (7) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-20 | 31,1(31)a | 37,2 (33) | 30,8 (32) | 32,4 (30) | 36,1 (34) | 37,3 (33) | 39,9 (35) |
| 20-40 | 23,6 (23) | 28,2 (25) | 23,1 (24) | 25,6 (23) | 23,8 (22) | 27,9 (25) | 28,0 (25) |
| 40-100 | 45,0 (46) | 47,6 (42) | 43,2 (44) | 52,3 (47) | 45,6 (44) | 47,8 (42) | 45,1 (40) |
| Totalb | 99,7 b | 113,0 a | 97,1 b | 110,3 a | 105,5 ab | 113,0 a | 113,0 a |

[a] Valores entre parênteses indicam a proporção do total (0-100 cm) de carbono acumulado em cada camada de solo

[b] Médias seguidas pela mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($P<0,05$), LSD=10,34 t/ha

Fonte: Silva et al. (2004, p. 359)

O estoque de carbono em 1,0 m de profundidade foi igual a 100 Mg/ha na pastagem nativa (1) e variou de 97 Mg/ha em pastagem degradada de *B. decumbens* (3) a 113 Mg/ha na *P. maximum* (2) e nos dois campos de produção de sementes (*B. brizantha* (6) e *P. atratum* (7)), como mostrado na Tabela 5. A magnitude dos valores de estoque de carbono encontrados neste trabalho (cerca de 100 Mg/ha), diferem consideravelmente dos encontrados por Fisher et

al. (1994), de, aproximadamente, 200 Mg/ha, nas Savanas da Colômbia e dos encontrados por Corazza et al. (1999), de 150 Mg/ha, em pastagem cultivada de *B. decumbens* no Cerrado; todos eles amostrada os na mesma profundidade do perfil.

Segundo Silva et al. (2004), o manejo afeta principalmente as camadas superficiais, a quantidade de carbono encontrada no subsolo nas camadas 40-60, 60-80 e 80-100 cm foi representada pela camada 40-100 cm. O padrão de distribuição da concentração de carbono no perfil do solo foi aproximadamente o mesmo em todos os campos (Figura 6). A quantidade de carbono acumulado até uma profundidade de 40 cm no perfil do solo era mais do que 50% do total de todos os campos (Tabela 5), semelhante às tendências observadas por Fisher et al. (1994) em solos de Savanas Colombianas e por Corazza et al. (1999) em diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Vermelho Escuro, incluindo uma pastagem cultivada.

Atualmente, mais de 50 milhões de hectares de pastagens cultivadas na região do Cerrado tem sido mal fertilizadas e inadequadamente pastadas. Os resultados dos estudos realizados por Silva et al. (2004) mostraram que o acúmulo de carbono do solo em áreas de pastagens degradadas ou processo de degradação não contribui de forma significativa para o declínio do $CO_2$ atmosférico, bem como para a redução da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

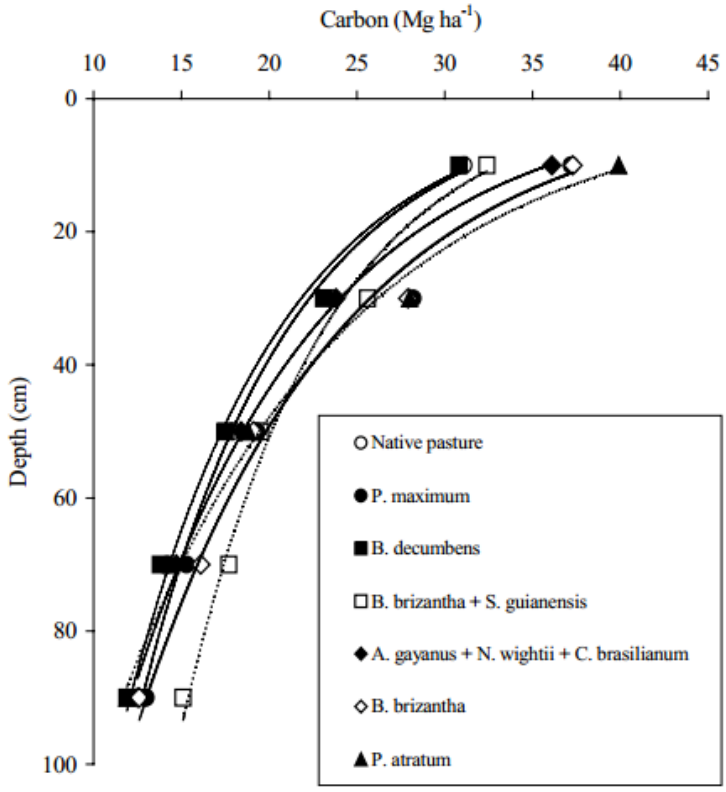



**Figura 6:** Distribuição do Carbono em perfis de solos do Cerrado sob pastagens cultivadas.
Fonte: Silva et al. (2004)

Com o intuito de estimular a recuperação de pastagens degradadas, o governo federal tem criado alguns programas Agropecuários, administrados pelo BNDES, com destaque para o Programa para Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa na Agricultura – Programa ABC, cujos objetivos são: [1] reduzir as emissões de gases de efeito estufa oriundas das atividades agropecuárias; [2] reduzir o desmatamento; [3] aumentar a produção agropecuária em bases sustentáveis; [4] adequar as propriedades rurais à legislação ambiental; [5] ampliar a área de florestas cultivadas; e [6] estimular a recuperação de áreas degradadas. As operações no âmbito do Programa ABC são realizadas através das instituições financeiras credenciadas. Produtores rurais (pessoas físicas ou jurídicas), e suas cooperativas podem solicitar investimentos destinados a empreendimentos de recuperação de pastagens degradadas (ABC Recuperação); implantação de sistemas orgânicos de produção agropecuária (ABC Orgânico);

implantação e melhoramento de sistemas de plantio direto "na palha" (ABC Plantio Direto); implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária, lavoura-floresta, pecuária-floresta ou lavoura-pecuária-floresta e de sistemas agroflorestais (ABC Integração); implantação, manutenção e melhoramento do manejo de florestas comerciais, inclusive aquelas destinadas ao uso industrial ou à produção de carvão vegetal (ABC Florestas); adequação ou regularização das propriedades rurais frente à legislação ambiental, inclusive recuperação da reserva legal, de áreas de preservação permanente, recuperação de áreas degradas e implantação e melhoramento de planos de manejo florestal sustentável (ABC Ambiental); implantação, manutenção e melhoramento de sistemas de tratamento de dejetos e resíduos oriundos de produção animal para geração de energia e compostagem (ABC Tratamento de Dejetos); implantação, melhoramento e manutenção de florestas de dendezeiro, prioritariamente em áreas produtivas degradadas (ABC Dendê); e estímulo ao uso da fixação biológica do nitrogênio (ABC Fixação).

Atualmente, a degradação das pastagens é o maior obstáculo para o estabelecimento de uma pecuária bovina sustentável em termos agronômicos, econômicos e ambientais no Cerrado (SILVA et al., 2004), o que provoca a diminuição no seqüestro de carbono que representa uma compensação às emissões de $CO_2$ (PAULINO; TEIXEIRA, 2009).

# CAPÍTULO II

# LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO

# CAPÍTULO II

# LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO

Com o intuito de avaliar as alterações nos atributos físicos e na matéria orgânica do solo decorrentes da conversão da vegetação de Cerrado em sistemas cultivados, foi selecionada uma área representativa da paisagem regional, com pastagens cultivadas estabelecidas em diferentes períodos e Cerrado nativo, utilizado como solo de referência.

A área de pesquisa localiza-se na Fazenda Cachoeira, situada no interflúvio dos ribeirões Panga e Douradinho, com acesso no km 37 da BR 497, sudoeste do município de Uberlândia na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, entre as coordenadas 19º04’06” - 19º09’22” de latitude Sul e 48º33’37” e 48º36’31” de longitude Oeste (Figura 7).

A propriedade possui cerca de 2.300 hectares e pertence ao Sr. Christian Reinhold Hacker desde o ano de 1975, o que garante um histórico e/ou evolução de uso do solo conhecido há mais de 30 anos. A região onde se insere a fazenda é originalmente recoberta pela vegetação de Cerrado que tem sido, desde a década de 1970, fortemente desmatada por ser uma das áreas pioneiras de expansão do agronegócio no Bioma Cerrado.

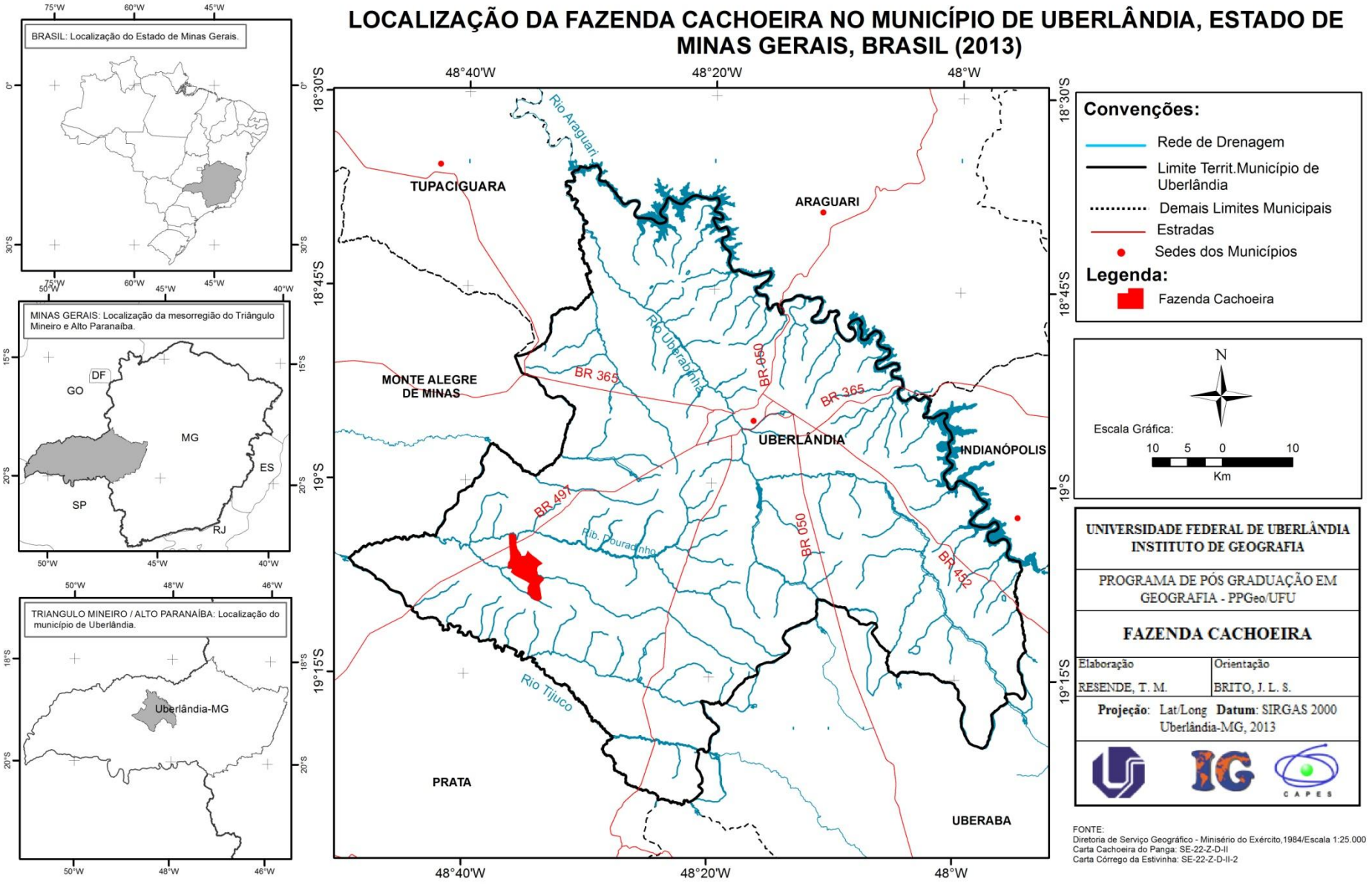



**Figura 7:** Localização da Fazenda Cachoeira no município de Uberlândia, Estado de Minas Gerais, Brasil (2013).

Portanto, a área de estudo apresenta feições e características físicas e ambientais comuns e/ou similares à região em que está inserida.

## 2.1. Clima

O clima da região confunde-se com o do Centro-Oeste e grande parte do Sudeste do Brasil (ROSA et al., 2004), e apresenta estações climáticas bem definidas, uma seca, que abrange os meses de abril a setembro, e outra úmida, de outubro a março.

O comportamento do clima regional depende da dinâmica dos sistemas de circulação atmosférica que atuam nos diferentes períodos do ano. A estabilidade do ar, que se observa entre os meses de maio a setembro, é derivada da instalação da Massa de Ar Polar, que se tropicaliza e se estabiliza sobre o planalto Central Brasileiro, impedindo o fluxo de umidade proveniente da Amazônia. É nesse período que, além de seco, o ar torna-se mais frio, particularmente nas madrugadas, embora, durante o dia, a insolação seja quase que permanente.

> Nos meses de Outubro/Novembro observa-se o enfraquecimento dos sistemas de baixa circulação associados a Massa Polar e a instalação de sistemas tropicais, de baixa pressão, portanto instáveis, que atraem a umidade da Amazônia para o Centro-Sul do Brasil. Esse fato determina o início do período chuvoso. Essa estação é mais agradável, do ponto de vista térmico, porém apresenta dias com elevada nebulosidade, alternando-se horas de insolação com pancadas de chuva (ROSA et al., 2004, p.80).

De acordo com Feltran Filho (1997), o clima da região é o tropical, caracterizado pela alternância de estações úmidas e secas, por influência sazonal de massas de ar. As condições climáticas predominantes na área de estudo são bastante semelhantes às encontradas no Brasil Central Tropical, com dois períodos bem definidos: um seco e outro chuvoso.

Lima, Queiroz Neto e Lepsch (2004) destacaram a pluviometria anual com irregularidade considerável, variando de 800 a 2.000 mm, com uma média variando entre 1.200 a 1.500 mm/ano. Essa condição climática favorece alto potencial agrícola para a região, considerando o período de crescimento de que necessitam as culturas para obter pleno desenvolvimento (período seco e período chuvoso).

Portanto, a precipitação atmosférica média dessa região é de aproximadamente 1.550 mm, concentrada nos meses mais chuvosos que são dezembro e janeiro, representando cerca de 41% da precipitação média anual. Os meses menos chuvosos são junho e julho (ROSA; LIMA; ASSUNÇÃO, 1991). A temperatura média anual é de 22° C, sendo que os meses mais quentes são fevereiro (23,5°C), outubro e novembro (23,4°C) e os meses mais frios junho e julho (18,8°C) (ROSA; LIMA; ASSUNÇÃO, 1991).

A partir de uma análise de dados de precipitação e temperatura de cinco estações climatológicas da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (Araxá, Uberlândia, Patos de Minas, Uberaba e Capinópolis), no período de 15 anos (1981 a 1995), Feltran Filho (1997) concluiu que,

> 1) as frentes frias que atingem o Oeste mineiro não produzem longos períodos de baixas temperaturas;
> 2) a análise dos totais mensais das precipitações registra o caráter tropical do ritmo pluviométrico, com chuvas concentradas nos meses mais quentes do ano;
> 3) as temperaturas absolutas, em termos de valores extremos, registradas em cinco estações meteorológicas, não podem ser explicadas pelas altimetrias, mas sim pela situação geográfica de cada localidade;
> 4) o mês de julho caracteriza-se como o mês mais frio e o mês de novembro como o mês mais quente;
> 5) o mês mais seco é o mês de agosto e o mês mais úmido é o de janeiro.
> 6) para os totais máximos de 24 horas aponta-se o fato de que chuvas excepcionais, em meses habitualmente com menores valores de precipitação (setembro e outubro), podem causar graves prejuízos ao meio ambiente, principalmente com relação à erosão superficial, uma vez que nesses períodos o solo se encontra descoberto por vegetação;

Abordando as características climáticas em escala local, particularmente na cidade de Uberlândia, Del Grossi (1991) *apud* Mendes (2001, p.75) afirma que,

> [...] a dinâmica atmosférica em Uberlândia está sob controle, principalmente dos sistemas intertropicais, cuja participação no transcorrer do ano é superior a 50%, completada com a atuação dos sistemas polares, cuja participação é pouco superior a 25%. A atuação desses sistemas de circulação ocasiona sobre Uberlândia a formação de um clima tropical alternadamente seco e úmido.

## 2.2. Geologia e Solos

Sob o aspecto geológico, o oeste do estado de Minas Gerais é caracterizado por duas áreas distintas, balizadas, grosso modo, pelo rio Araguari: uma constituída de coberturas sedimentares e magmáticas básicas (basalto) de idade Mesozóica e Cenozóica e outra, com predominância de rochas metamórficas e magmáticas mais antigas, que remontam ao Pré-Cambriano (NISHIYAMA; BACCARO, 1989). Segundo Hasui (1967), na área do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba ocorre rochas cristalinas e metamórficas de vários grupos e corpos graníticos, que integram o substrato do Complexo Cristalino.

A Bacia Sedimentar do Paraná, através das chapadas esculpidas em rochas areníticas do Grupo Bauru (Formação Marília – Cretáceo Superior), é a unidade morfoestrutural mais representativa do Triângulo Mineiro e do município de Uberlândia. De acordo com Nishiyama (1989) e Baccaro et al. (2001), outras estruturas geológicas importantes e de ocorrência no município de Uberlândia são as rochas efusivas do Grupo São Bento, representadas pelos basaltos da Formação Serra Geral (Mesozóico) e os micaxistos do Grupo Araxá (Pré-Cambriano).

Os arenitos eólicos da Formação Botucatu (Grupo São Bento) compõem a base estratigráfica mesozóica na região analisada. As camadas areníticas apresentam-se intertrapeadas com os basaltos, e na maioria das vezes, tem sua estrutura silicificada pelo contato com os derrames. Os derrames basálticos da Formação Serra Geral, Cretáceo Inferior, recobrem os arenitos da Formação Botucatu em toda sua área de ocorrência, sendo que nas áreas de inexistência dos arenitos, os basaltos assentam-se diretamente sobre as rochas de embasamento. Já no Cretácio Superior os sedimentos do Grupo Bauru fecham o ciclo de deposição na referida bacia. Os depósitos cenozóicos compreendem colúvios pedogenizados localizados em áreas de escarpa de basalto, depósitos inconsolidados de fundo de vale e depósitos fluviais caracterizados por areais e cascalhos (OLIVEIRA, 2009 *apud* SOARES et al., 2012).

Recobrindo a maior parte do Triângulo Mineiro são encontrados sedimentos mais jovens, mapeados como Terciário e/ou Quaternário, trata-se de uma cobertura detrítico-laterítica ainda pouco estudada. Para Nishiyama (1989) e Barbosa et al. (1970) estes sedimentos devem ser considerados como sendo do Grupo Bauru.

Nishiyama (1989) descreve a cobertura Cenozóica como uma capa que recobre toda a extensão do município de Uberlândia sobrepondo as demais rochas areníticas constituídas de cascalheiras de tamanhos de seixos e espessura variada, que geralmente apresentam revestimentos de óxidos de ferro. A cimentação incipiente dos sedimentos Cenozóicos arenosos tem levado a região a ter grandes problemas com a erosão acelerada. Associando a essa cobertura friável soma-se a elevada porosidade e permeabilidade dos solos, a devastação da cobertura vegetal, o regime de precipitação e a proximidade do lençol freático da superfície que favorece o surgimento do aquífero contribuindo para que a erosão dos solos seja um prejuízo urbano e rural.

Segundo Ab' Saber (1971) e Novaes Pinto (1990) *apud* Feltran Filho (1997), no Terciário, a região Centro-Oeste do Brasil passou de um clima de maior aridez predominante no Cretáceo para um clima mais úmido no Cenozóico Inferior. A presença de maior umidade proporcionou erosão vertical com o aprofundamento dos vales e a erosão horizontal (intemperismo e escoamento superficial) promoveu um desnivelamento topográfico. O maior encaixamento dos canais fluviais favorece o recuo das vertentes e rebaixamento topográfico pela contínua remoção de sedimentos dos topos para a base das vertentes. Ainda segundo esses autores, as oscilações climáticas no Cenozóico associadas às oscilações epirogenéticas deram origem a novos sistemas naturais, com a evolução das vertentes e dos vales. Nesse período há uma reorganização da rede de drenagem e a instalação dos principais rios da região em falhamentos preexistentes.

Esse breve relato dos possíveis acontecimentos durante a evolução tectono-sedimentar da Bacia do Paraná foi feito para mostrar que o Triângulo Mineiro é resultado de um longo processo de estruturação e que, o conhecimento da estruturação geológica é a base para o entendimento da estruturação das paisagens e formação dos solos.

De uma forma geral, os solos das áreas mais planas são considerados ácidos e com baixa saturação de bases e elevado teor de alumínio trocável, e segundo Nishiyama (1998) são resultantes de materiais provenientes da Formação Marília e da cobertura detrito-laterítica de idade Terciária. Os tipos distróficos diferem do álico pela sua baixa saturação em alumínio, originados dos materiais arenosos ou argilosos da cobertura detrito-laterítica. Em áreas com topos aplainados, com altitudes superiores a 850 metros, predomina a Formação Marília do Grupo Bauru, dando origem a solos de textura média ou arenosa, classificados como Latossolo Vermelho-amarelo. Nas áreas inferiores a 850 metros de altitude ocorrem solos

derivados dos basaltos da Formação Serra Geral, confirmando os estudos de Nishiyama (1989) que a presença de basalto nas vertentes dos rios favoreceu a formação dos Latossolos Vermelhos, diferentes das áreas de topo plano onde prevalecem as rochas sedimentares do Grupo Bauru e os sedimentos recentes do Cenozóico, posições na qual aparecem os Latossolos Vermelho-amarelados a Amarelo-avermelhados (SOARES et al., 2009).

Os Latossolos ocorrem em declives planos a suave-ondulados (<8%) que facilitam intensas atividades agrícolas, desde que suas naturais limitações em fertilidade sejam corrigidas (MIELNICZUCK, 2008), tendo em vista que se trata de solos ácidos e pobres, por causa da quantidade excessiva de alumínio disponível e da ausência de nutrientes, desfavorecendo o desenvolvimento das plantas (SANTOS, BACCARO, 2004). No entanto, após correção, esses solos são considerados de grande potencial para a produção agrícola de culturas anuais e perenes e também para pastagens.

Segundo a Embrapa (1999), ocorrem no município de Uberlândia os seguintes tipos de solos: Latossolo Vermelho ácrico e distroférrico; Latossolo Amarelo coeso; e Glei Húmico álico e distrófico. Os tipos Glei Húmico são solos típicos de áreas mal drenadas e pouco permeáveis e que compreendem as porções de fundo de vales, ou áreas de topo de chapada, ou média encosta. As hidromorfias predominam também nos topos planos, amplos e extensos, com baixas declividades e na média encosta, sobre as rupturas lateríticas. Essas estruturas de concreção de ferro formam uma base impermeável que pode ser oferecida pelos arenitos argilosos ou pelo embasamento basáltico (NISHIYAMA, 1998).

Sobre esses solos Baccaro (1991) descreveu alguns processos erosivos em que o ressecamento dessas áreas ocorre devido ao desmatamento, seguido de fendilhamento dos solos, até que

evoluem com a ajuda do escoamento superficial, se transformando em ravinas que progridem para voçorocas.

Os solos nos sopés ou nas rampas coluvionadas, que se seguem às bordas escarpadas da chapada e ao topo dos relevos residuais, são solos com um teor de carbonato de cálcio maior que os outros solos da região, uma vez que recebem através da dissolução, tais bases solúveis. Em decorrência de um pH menos ácido e da presença contínua de águas próximas aos contatos litológicos, a vegetação, que ocorre nos sopés dessas serras, é uma vegetação de mata exuberante (PEREIRA, 1996).

## 2.3. Relevo

A região do Triângulo Mineiro está inserida na grande área denominada por Ab'Saber (1971) como "Domínio dos Chapadões Tropicais do Brasil Central", ou ainda na região denominada pelo projeto RadamBrasil (1983) de "Planaltos e Chapadas da Bacia Sedimentar do Paraná". São relevos que estão em elaboração desde o Terciário resultando em extensas superfícies aplainadas e dissecadas. Trata-se de uma área que passou por alguns eventos tectônicos, que originaram as litologias presentes, e alterações climáticas que ocorreram no Terciário e no Quaternário propiciando extensas pediplanações, laterização e dissecação, levando o relevo a apresentar as formas atuais. Destacam-se os chapadões separados por vales profundos e largos, que podem atingir rochas Pré-Cambrianas, com vertentes bastante dissecadas pelo entalhamento dos principais rios da região, como o Paranaíba e o Araguari.

O padrão de relevo predominante é caracterizado por topos nivelados e amplos interflúvios, com vertentes convexas e baixas declividades. A exceção é o vale do Araguari, onde a erosão

fluvial chegou a exumar as rochas Pré-Cambrianas do Grupo Araxá. A porção sudoeste do município de Uberlândia insere-se nesse primeiro tipo de modelado. King (1956) caracterizou níveis de aplainamento que podem ser identificados na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Chamou de superfície "Pós-Gondwana" o nível de aplainamento com altitude entre 1.100 – 1.400 m, que são os topos mais elevados da região que vão desde a Serra da Canastra, Serra da Bocaina, Serra do Salitre até Patrocínio. A superfície "Sul Americana" possui altitudes em torno de 950 – 1000 m, representada nos chapadões do Triângulo Mineiro, sobre a qual a topografia atual foi esculpida do Cretáceo Superior ao Plioceno. Outra superfície de aplainamento identificada no Triângulo Mineiro foi a "Superfície Velhas", entre 500 e 900 m, que proporcionou incisões em formas de vales ramificados os quais foram encaixados e elaborados nos períodos subseqüentes de semiaridez, deixando algumas superfícies embutidas nas bordas das chapadas, em altitudes de 650 a750 m, denominadas de "Superfície Araxá".

Baccaro (1991), em trabalho preliminar sobre a geomorfologia de toda a região do Triângulo Mineiro, levando em conta o nível de dissecação do relevo, classificou as áreas drenadas pelos rios Tijuco, Prata e Douradinho, dentre outros, como Áreas de Relevo Medianamente Dissecado, de ampla extensão geográfica no município. Num outro trabalho, Baccaro et al. (2001) propõem novas unidades geomorfológicas para a região. Segundo essa última classificação proposta, a área de pesquisa está localizada na unidade geomorfológica Planalto Dissecado do Tijuco, integrante da Morfoestrutura Bacia Sedimentar do Paraná. O padrão do modelado é denudacional de topo plano, caracterizando o aspecto tabular do relevo nessa área. As altitudes não ultrapassam dos 780 metros nos topos planos.

Levando em conta a Geologia e as formas e o nível de dissecação da morfologia Baccaro (1991) identificou no Triângulo Mineiro quatro unidades de relevo: Área de relevo

intensamente dissecado, Área de relevo medianamente dissecado, Área de relevos residuais e Área de relevo com topos planos, amplos e largos. Baccaro et al (2001) elaboraram mapa geomorfológico do Triângulo Mineiro utilizando abordagem morfoestrutural-escultural, resultando nas seguintes unidades geomorfológicas: Unidade Morfoestrutural Complexos Granito-Gnáissico e Metassedimentar, Unidade Morfoestrutural Bacia Sedimentar do Paraná (Planalto do Rio Grande-Paranaíba, Canyon do Araguari, Planalto Dissecado do Tijuco, Planalto Residual e Planalto Tabular) e Morfoestrutura das Planícies Fluviais Cenozóicas.

A unidade "Área de Relevo Intensamente Dissecado" de Baccaro (1991) ou "Unidade Morfoestrutural Granito-Gnáissico Metassedimentar" de Baccaro et al. (2001) corresponde à borda dos chapadões de Uberlândia, Araguari, Indianópolis, Santa Juliana, estendendo-se até os rios Paranaíba, Araguari e Quebra Anzol. Apresenta uma porção mais elevada entre 700 e 900 m, com topos aplainados e alongados, prolongando-se em forma de espigão entre os rios Paranaíba e as sub-bacias dos seus afluentes, Uberabinha, Piedade e Jordão. Esta área é representada por vales bem encaixados, vertentes abruptas com ocorrência de rupturas estruturais que originam corredeiras e cachoeiras. As maiores declividades estão entre 25º a 40° situadas nas rupturas das vertentes, relacionadas geralmente a afloramentos basálticos. Declividades mais suaves aparecem em rampas coluviais, onde se encontram solos férteis originários de material detrítico da alteração do basalto. A maior inclinação das vertentes constitui um fator importante no condicionamento dos processos erosivos de ravinamento.

As "Áreas de Relevo Medianamente Dissecado" de Baccaro (1991) ou "Planalto Dissecado do Tijuco e Planalto Rio Grande-Paranaíba" de Baccaro et al. (2001) apresentam topos nivelados entre 750 e 900 m, com formas suavemente convexas e retilíneas entre 3º e 15º de declividades. Ocupa parte do município de Uberlândia, Uberaba, Prata, Ituiutaba, Campina

Verde, entre outros. A Formação Marília do Grupo Bauru é a mais representativa na área, recoberta em grandes porções pelos sedimentos inconsolidados do Cenozóico, sobreposta ao basalto da Formação Serra Geral, que aflora no talvegue dos canais fluviais com entalhamento mais pronunciado como o rio Tijuco, Rio da Prata, Rio Verde, Rio da Babilônia, Ribeirão Douradinho, Ribeirão Panga e Rio Uberabinha.

Nas "Áreas de Relevo Medianamente Dissecado" é comum a presença do solo hidromórfico contornando os canais fluviais, revestido por vegetação típica, geralmente com burutis nas proximidades dos canais. As várzeas encontram-se entulhadas de sedimentos finos, que funcionam como filtro e armazenam umidade, mantendo certo equilíbrio hidromórfico entre vertente fundo de vale.

As "Áreas de Relevos Residuais" de Baccaro (1991) ou "Planalto Residual" de Baccaro et al. (2001) são caracterizadas por bordas escarpadas, erosivas, de até 150 m, em contornos irregulares, com declividades que podem atingir até 45°. Correspondem às porções mais elevadas, localmente denominadas serras, divisores de água das principais bacias hidrográficas do Triângulo Mineiro com altitudes entre 800 e 900 m. Tais porções residuais recebem localmente a denominação de "serras", como a do Parafuso, próxima a Prata, a do talhado, próxima a Comendador Gomes, a do Galga, entre Uberlândia e Uberaba, a da Divisa, próxima a Campina Verde, a de São Lourenço, próxima a Ituiutaba, dentre outras.

Os relevos residuais do Triângulo Mineiro apresentam litologia vinculada aos arenitos da Formação Marília, mantendo as bordas escarpadas, sustentadas por intensa cimentação carbonática e/ou silicosa. São representadas pelos arenitos calcíferos e calcários lenticulares do Membro Ponte Alta e por arenitos argilosos mosqueados, entre níveis conglomeráticos e

níveis carbonáticos do Membro Serra da Galga. Essa unidade apresenta relevo intensamente dissecado com formas convexas nas vertentes e anfiteatros mais expressivos e convexizados, com algumas formas mais agudas, verdadeiras relíquias residuais.

A unidade "Área de Relevo com Topos Planos, Amplos e Largos" de Baccaro (1991) ou "Planalto Tabular" de Baccaro et al. (2001) está representada pelos chapadões e áreas residuais dos mesmos. Os interflúvios apresentam-se largos, bastante suaves, com pouca ramificação e baixa densidade de drenagem. As áreas de topos planos estão representadas na área do projeto pelos chapadões do Rio Claro e rio Uberabinha. São áreas elevadas de cimeira entre 950 e 1250 m com topos planos, amplos e largos.

As microformas do relevo "murunduns" são comuns nesse setor, geralmente localizadas na zona de contato entre a baixa encosta e a planície aluvial. São pequenas elevações que ocorrem na periferia das planícies ou em depressões úmidas a nível de topo e encosta, remanescentes de antigas lagoas, possivelmente relacionadas à evolução morfogenética das planícies aluviais no Quaternário.

Quase todos os vales são amplos, de fundos úmidos, com características de veredas e escoamento fluvial anastomosado. Em certos trechos existe a mata galeria com buritis. Verifica-se também a presença de lagoas com diferentes níveis de água em função da sazonalidade climática a que as áreas estão sujeitas. Algumas se acham incorporadas às redes de drenagem atuais. RadamBrasil (1983) fez algumas referências com relação à sua origem e época de formação, destacando fazerem parte, em tempos pretéritos, de uma drenagem endorréica relacionada à climas mais secos que o atual. A área ocupada por elas exercia,

portanto, a função de uma “bajada”, ligada à dificuldade de escoamento a partir de baixas declividades.

Os processos geomorfológicos de escoamento pluvial difuso e laminar nas vertentes são os mais importantes na remoção de detritos, bem como constituem processos fundamentais na sua evolução. Sinais de erosão acelerada, sulcos, ravinas e voçorocas acontecem com menos intensidade. Porém são mais representativos em alguns locais onde o solo hidromórfico apresenta sinais de ruptura da sua estabilidade, constatada pelo fendilhamento profundo e ressecamento.

A região do Triângulo Mineiro apresenta uma diversidade de feições de relevo, dando um quadro heterogêneo de formas. Essa tipologia de formas é condicionada pelo arcabouço geológico e pela atuação dos processos geomorfológicos ao longo do tempo influenciados pelos fatores e componentes climáticos ocorridos principalmente durante o Terciário e Quaternário.

As grandes bacias hidrográficas, representadas pelos rios Paranaíba, Araguari e Grande, tem seus canais sulcando as estruturas rochosas e definindo vários conjuntos formados pelos interflúvios, vertentes e fundos de vales. Nos últimos 50 anos essas áreas vêm sendo apropriadas pelo homem e, na maioria dos casos, condicionam o uso e ocupação. Assim, nas áreas de topo plano das chapadas houve a intensificação das culturas, tendo o elemento relevo sido determinante, pelas facilidades da mecanização utilizada pelo agroindústria. As unidades de relevo com formas mais dissecadas, vales mais entalhados, vertentes com altas declividades foram ocupadas pelas pastagens.

Essas formas de relevo apresentam reações e respostas diferentes perante essa apropriação feita pelo homem, fazendo com que ative e acelere muitos processos de erosão de encosta, de assoreamento nos fundos de vale, de erosão nas barrancas fluviais e de rebaixamento dos mananciais d'água.

## 2.4. Vegetação

A mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba encontra-se inserida na vegetação do tipo Cerrado (RADAMBRASIL, 1983), que se caracteriza como uma formação do tipo savana tropical, com destacada sazonalidade (PROBIO, 2007). Sabe-se que o Cerrado ocupa uma área de, aproximadamente, 205,9 milhões de hectares na porção central do Brasil, embora também se estenda até o litoral nordeste do estado do Piauí e norte do estado do Paraná (Figura 8). O Cerrado é um bioma importante, não apenas pela área que ocupa, mas também pela riqueza da sua biodiversidade (KRUG et al., 2006).

As diferentes formas de relevo em Minas Gerais, somadas às especificidades de solo e clima, propiciam paisagens muito variadas, recobertas por vegetações características, adaptadas a cada um dos inúmeros ambientes particulares inseridos no domínio de três biomas brasileiros: o Cerrado, a Mata Atlântica e a Caatinga (Figura 9). O domínio do Cerrado, localizado na porção centro-ocidental, ocupa cerca de 57% da extensão territorial do Estado. Ele aparece especialmente nas bacias dos rios São Francisco e Jequitinhonha. Nesse bioma, as estações seca e chuvosa são bem definidas e a vegetação e composta por gramíneas, arbustos e árvores (IEF, 2014).

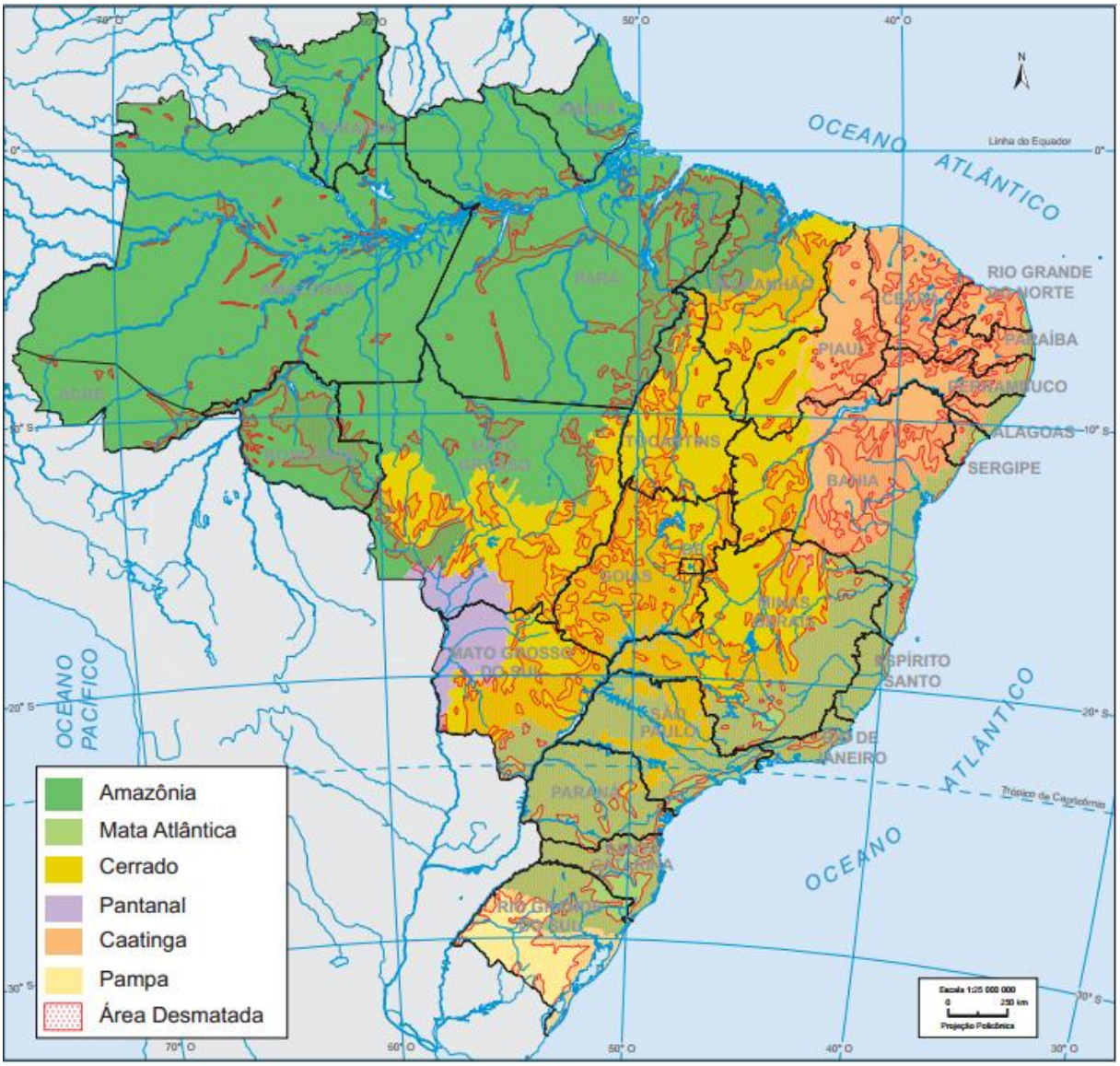



**Figura 8:** Biomas do Brasil.
Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2014)

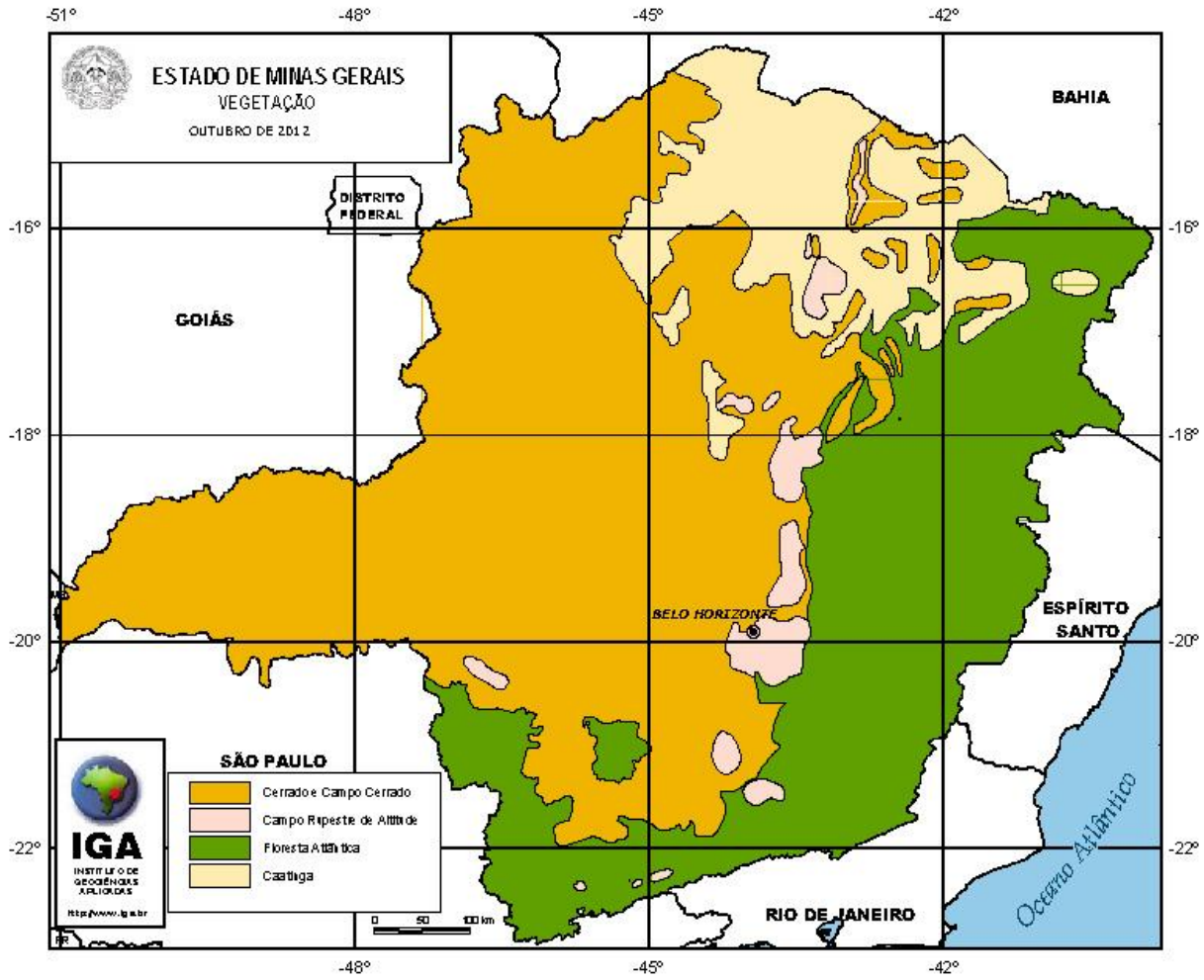



**Figura 9:** Vegetação do Estado de Minas Gerais, Brasil.
Fonte: Instituto de Geociências Aplicadas – IGA (2012)

O Cerrado configura-se em um grande mosaico de paisagens naturais, dominado por diferentes ecossistemas, que se apresentam com diferentes fitofisionomias. O termo 'Cerrado' tem sido usado tanto para designar tipos fitofisionômicos (tipos de vegetação) quanto para definir formação ou categorias fitofisionômicas (formas de vegetação). Também pode estar associado às características estruturais ou florísticas particulares, encontradas em regiões específicas.

> O bioma Cerrado é um complexo vegetacional, composto por três formações: florestais, com formação de dossel contínuo ou descontínuo e predomínio de espécies arbóreas; savânicas, com presença de áreas com árvores e arbustos espalhados sobre um estrato graminoso, sem a formação de dossel contínuo; e campestre, que engloba áreas com predomínio de espécies herbáceas e algumas arbustivas, mas sem a presença de árvores na paisagem (PROBIO, 2007, p.18).

A vegetação do bioma Cerrado apresenta fisionomias que englobam formações florestais, savânicas e campestres (RIBEIRO; WALTER, 1998). Segundo Eiten (1994) *apud* Ribeiro e Walter (1998) as demais formas fisionômicas do Cerrado dependem de três aspectos do substrato: a fertilidade e o teor de alumínio disponível (baixa fertilidade, altos teores de alumínio); a profundidade do solo; e o grau de saturação hídrica das camadas superficiais e subsuperficiais do solo.

Segundo Ribeiro e Walter (1998), são descritos onze tipos principais de vegetação para o bioma Cerrado (Figura 10), 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).

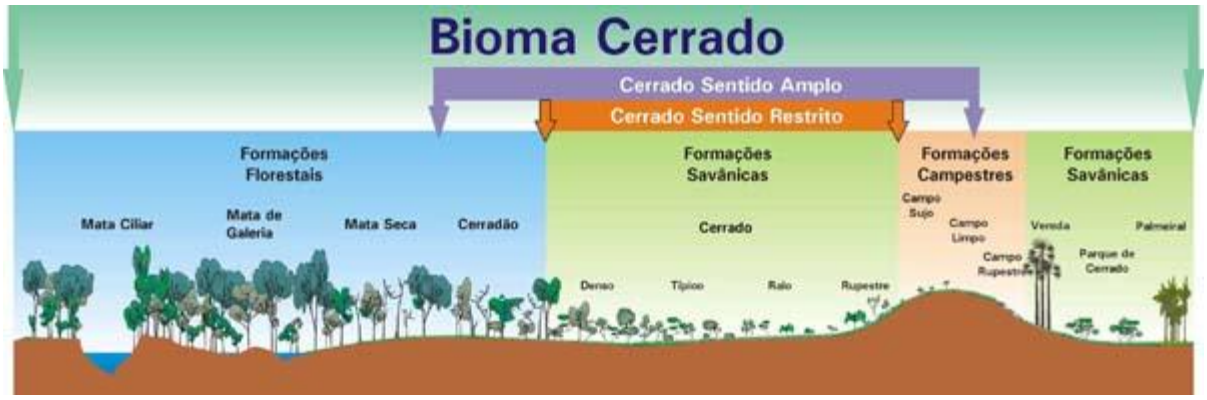



**Figura 10:** Representação dos tipos de vegetação do bioma Cerrado.
Fonte: Ribeiro e Walter (1998)

Dentre as formações florestais do bioma Cerrado, a Mata Ripária pode ser subdividida em duas categorias: Mata Ciliar e Mata de Galeria. A Mata Ciliar é definida como a vegetação florestal que acompanha os rios de médio e grande porte na região do Cerrado, em que a vegetação arbórea não forma galerias. Em geral, essa mata é relativamente estreita em ambas as margens, dificilmente ultrapassando 100 metros de largura em cada. É comum a largura em cada margem ser proporcional à do leito do rio, embora áreas planas a largura possa ser

maior. Porém, a Mata Ciliar ocorre geralmente sobre terrenos acidentados, podendo haver uma transição nem sempre evidente para outras fisionomias florestais com a Mata Seca e o Cerradão.

Por Mata de Galeria entende-se a vegetação florestal que acompanha os rios de pequeno porte e córregos, formando corredores fechados (galerias) sobre o curso de água. Geralmente a Mata de Galeria localiza-se nos fundos dos vales ou nas cabeceiras de drenagem onde os cursos de água ainda não escavaram um canal definitivo. Essa fisionomia é perenifólia, isto é, não apresenta queda de folhas na estação seca. Quase sempre a Mata de Galeria é circundada por faixas de vegetação não florestal em ambas as margens, e em geral ocorrem uma transição brusca com formações savânicas e campestres. Essa transição é quase imperceptível quando ocorre com Matas Ciliares, Matas Secas ou mesmo Cerradões, o que é mais raro, embora seja diferenciada pela composição florística. A altura média do estrato arbóreo varia entre 20 e 30 metros, apresentando uma superposição das copas que fornecem cobertura arbórea de 70% a 95%. No seu interior a umidade relativa é alta mesmo na época mais seca do ano. A presença de árvores com pequenos sapopemas (expansões tabulares encontradas no caule de algumas árvores) ou saliências nas raízes é frequente, principalmente nos locais mais úmidos. É comum haver grande número de espécies epífitas (plantas que apóiam na estrutura de outras plantas, sem parasitá-la), principalmente *Orchidaceae*, em quantidade superior a que ocorre nas demais formações florestais do Cerrado.

Sob a designação Mata Seca estão incluídas as formações florestais caracterizadas por diversos níveis de caducifólia (queda de folhas) durante a estação seca, dependentes das condições químicas, físicas e principalmente da profundidade do solo. A Mata Seca não possui associação com cursos de água, ocorrendo nos interflúvios (área mais elevada situada

entre vales) em solos geralmente mais ricos em nutrientes. Em função do tipo de solo, da composição florística e, em conseqüência, da queda de folhas no período seco, a Mata Seca pode ser de três subtipos: Mata Seca Sempre-Verde, Mata Seca Semidecídua (a mais comum), e Mata Seca Decídua. Em todos esses subtipos a queda de folhas contribui para o aumento da matéria orgânica no solo, mesmo na Mata Seca Sempre-Verde. A altura média do estrato arbóreo varia entre 15 e 25 metros. A grande maioria das árvores é ereta, com alguns indivíduos emergentes.

O Cerradão é uma formação florestal com aspectos xeromórficos (resistência à seca), tendo sido conhecido pelo nome "Floresta Xeromorfa", tipificado como sendo "uma mata mais rala e fraca" (RIZZINI, 1963; CAMPOS, 1943 *apud* RIBEIRO; WALTER, 1998). Caracteriza-se pela presença de espécies que ocorrem no Cerrado sentido restrito e também por espécies de mata (RIBEIRO; WALTER, 1998). Do ponto de vista fisionômico, o Cerradão é uma floresta, mas floristicamente é mais similar a um Cerrado. O Cerradão apresenta dossel (copa) predominantemente contínuo e sua cobertura arbórea que pode oscilar entre 50 e 90%. A altura média do estrato arbóreo varia de 8 a 15 metros, proporcionando condições de luminosidade que favorecem a formação de estratos arbustivos e herbáceos diferenciados. De acordo com a fertilidade do solo, o Cerradão pode ser classificado como Cerradão Distrófico (solos pobres) ou Cerradão Mesotrófico (solos mais ricos), cada qual possuindo espécies características adaptadas a esses ambientes.

O Cerrado Sentido Restrito (*sensu stricto*) apresenta uma camada herbácea bem desenvolvida com pequenas árvores e arbustos dispersos e caracteriza-se pela presença de árvores baixas, inclinadas, tortuosas, com ramificações irregulares, retorcidas e geralmente com evidências de queimadas. Os arbustos e subarbustos encontram-se espalhados, com algumas espécies

apresentando órgãos subterrâneos perenes (xilopódios), que permitem a rebrota após a queima ou corte. Na época chuvosa os estratos subarbustivo e herbáceo tornam-se exuberantes devido ao seu rápido crescimento. Os troncos das plantas lenhosas em geral possuem cascas com cortiça grossa, fendida ou sulcada, e as gemas apicais de muitas espécies são protegidas por densa pilosidade. As folhas em geral são rígidas e coriáceas. Essas características fornecem aspectos de adaptação às condições de seca (xeromorfismo). Devido à complexidade de seus fatores condicionantes, tem-se subdivisões fisionômicas distintas do Cerrado sentido restrito, sendo as principais o Cerrado Denso, o Cerrado Típico e o Cerrado Ralo, além do Cerrado Rupestre.

O Cerrado Rupestre é um subtipo de vegetação arbóreo-arbustiva que ocorre em ambientes rupestres litólicos ou rochosos (áreas de afloramento de rochas). Possui cobertura arbórea variável de 5% a 20%, altura média de 2 a 4 metros, com estrato arbustivo-herbáceo também destacado. Pode ocorrer em trechos contínuos, mas geralmente aparece em mosaicos, incluído em outros tipos de vegetação. Possui estrutura semelhante ao Cerrado Ralo e um substrato de fácil diferenciação, uma vez que comporta pouco solo entre o afloramento de rocha. No Cerrado Rupestre os indivíduos arbóreos concentram-se nas fendas entre as rochas, e a densidade é variável e dependente do volume de solo. Há casos em que as árvores podem dominar a paisagem, enquanto em outras a flora arbustiva-herbácea predomina; mas ainda assim com árvores presentes (RIBEIRO; WALTER, 1998).

Dentre a formação savânica, além do Cerrado sentido restrito, destaca-se ainda as veredas, que se revestem de grande importância pela representatividade espacial e pela importância na dinâmica hídrica regional (LIMA; QUEIROZ NETO, 1996). As veredas se constituem em cabeceiras de drenagem, comportando afloramento do lençol freático ou, ainda, representam

zonas topograficamente deprimidas nas superfícies dos platôs com lençol freático suspenso. Em todos os casos, comportam solos hidromórficos com altos teores de matéria orgânica. A vegetação atual consiste na associação de vegetação herbáceo-graminosa e arbóreo-arbustiva com destaque para a palmeira Buriti (*Mauritia flexuosa*) (CARVALHO, 1991; GUIMARÃES; ARAÚJO; CORRÊA, 2002). As Veredas são circundadas por Campo Limpo, geralmente úmido, e os buritis não formam dossel como ocorre no Buritizal. Nas Veredas os buritis caracterizam-se por altura média de 12 a 15 metros e a cobertura varia de 5% a 10%. As Veredas são encontradas em solos hidromórficos, saturados durante a maior parte do ano. Geralmente ocupam os vales ou áreas planas acompanhando linhas de drenagem mal definidas, em geral sem murundus. Também são comuns numa posição intermediária do terreno, próximo as nascentes (olhos d'água), ou na borda de matas de galeria. A concorrência da Vereda condiciona-se ao afloramento do lençol freático, decorrente de camadas de permeabilidade diferentes em áreas sedimentares do Cretáceo e Triássico (RIBEIRO; WALTER, 1998). As Veredas exercem papel fundamental na manutenção da fauna do Cerrado pois atua como local de pouso para a avifauna, de refúgio, de abrigo, de fonte de alimento e de local de reprodução também para a fauna terrestre e aquática.

Dentre a formação campestre, tem-se o Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre. O Campo Sujo é um tipo fisionômico exclusivamente herbáceo arbustivo, com arbustos e subarbustos esparsos cujas plantas, muitas vezes, são constituídas por indivíduos menos desenvolvidos das espécies arbóreas do Cerrado sentido restrito. O Campo Limpo apresenta estrutura fisionômica predominantemente herbácea, com arbustos raros e ausência de árvores (KRUG et al., 2006).

A estrutura da vegetação tem grande influência no habitat das espécies e, conseqüentemente, na composição faunística dos ecossistemas (ALHO; PEREIRA, 1987 *apud* RIBEIRO; WALTER, 1998). As diferentes fitofisionomias do Cerrado permitem que a fauna neste bioma seja bastante diversificada. Estima-se que existam 837 espécies de aves (49,9% do total no Brasil), 212 espécies de mamíferos (40,5% do total no Brasil), 180 espécies de répteis, 150 espécies de anfíbios (sendo 32 endêmicos) e 67.000 espécies de invertebrados. De acordo com informações da Embrapa (2007), existem 320.000 espécies de plantas e animais, um valor que representa cerca de 30% das espécies existentes no Brasil.

Apesar de sua importância, o Cerrado vem sendo submetido às altas taxas de desmatamento e de conversão do uso da terra em função da ocupação antrópica, sendo considerado um dos 25 ecossistemas mais ricos e mais ameaçados do planeta. Algumas ações antrópicas influenciaram bastante nesse desmatamento, como a ocupação da superfície por centros urbanos, a prática da agricultura e pecuária.

A região do Triângulo Mineiro sofreu um grande processo de modernização tecnológica no campo, responsável pela expansão das áreas cultivadas, pelo aumento da produção e da produtividade nas áreas de Cerrado. Segundo Cleps et al. (2004), essa região recebeu significativas aplicações de recursos com a implementação de programas oficiais, como o Programa de Crédito Integrado (PCI/1972-1975) e o Programa Nipo-Brasileiro de Desenvolvimento Agrícola da Região dos Cerrados (PRODECER). Pode-se assegurar que esses programas foram, de maneira geral, os responsáveis pela modernização da atividade agrícola no Cerrado, visto que favoreceram a ocorrência de mudanças na base técnica e produtiva; como exemplo tem-se a mecanização de grandes extensões de terra, as inovações tecnológicas, a introdução de novas culturas, como café, soja e milho, etc.

Com a expansão do agronegócio, desde a década de 1970, a vegetação do Cerrado e suas diferentes fitofisionomias foram substituídas por pastagens e sistemas agrícolas (especialmente de grãos – milho, soja, etc.), provocando desequilíbrios, contaminação por agroquímicos, erosão, compactação, diminuição da fertilidade dos solos e principalmente, à diminuição do volume e qualidade das águas (CLEPS et al., 2004). Pesquisas realizadas nos últimos anos têm demonstrado que esse processo de modernização da agricultura nessa região tem gerado diversas conseqüências ambientais (BRITO, 2004). Atualmente, as áreas remanescentes de vegetação natural correspondem, de modo geral, às áreas de reserva legal das propriedades rurais, como determina a legislação ambiental. Na área de pesquisa, a vegetação de Cerrado existente na propriedade refere-se à área de reserva legal.

## 2.5. A Ocupação do Cerrado e a Conversão da Vegetação nativa em Sistemas Cultivados

Segundo Barbosa (2010), o avanço sobre o Cerrado pode ser dividido em quatro frentes de ocupação. A primeira frente teve início no final do século XVII e está relacionada à atividade de mineração, desenvolvida mais intensivamente na região de Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás. Essa prática durou praticamente um século e meio e provocou alterações no ambiente de Cerrado, incorrendo em diversos impactos ambientais como processo erosivo nas margens dos rios, danos sobre a rede hídrica em razão do uso indiscriminado de mercúrio e o assoreamento dos cursos d'água.

Com a decadência da mineração nas regiões do Cerrado, por volta do final do século XVIII, ganharam força as atividades de lavoura e pecuária de subsistência, que vagarosamente já vinha sendo implantada ao longo do período da mineração. No início do século XX, a nova

frente de ocupação do Cerrado chega pelas ferrovias. A criação da malha ferroviária coincidiu com a busca de áreas limítrofes para a dinamização do processo econômico da economia paulista. As linhas de ferro construídas facilitavam o transporte de produtos ao mercado consumidor e assim houve um crescimento na produção agrícola e de gado no Cerrado. Além de que o processo de expansão da ferrovia promoveu a criação de inúmeras cidades. O resultado dessa dinamização resultou em rápida conversão da vegetação.

A terceira frente de ocupação do Cerrado se deu através da 'Marcha para o Oeste'. Criada pelo governo Vargas, este projeto tinha como objetivo a integração nacional por meio de uma política desenvolvimentista que efetivasse a ocupação do planalto central e, a partir dele, o desbravamento da Amazônia. Além disso, visava também ao aumento da produção agrícola para sustentar as indústrias do centro sul do país e a absorção do excedente populacional de outras regiões mais pobres.

Por fim, a quarta e última frente de ocupação se deu através da agropecuária moderna. Na década de 1950, configurava-se um novo processo de produção agrícola no país, em virtude do modelo de industrialização vigente, que por sua vez, proporcionou a modernização da agricultura.

Conforme Machado et al. (2004), possivelmente, a abertura de áreas de pastagem para a criação de gado de corte foi a principal causa de desmatamento do Cerrado. Contudo, nas últimas décadas, as pressões sobre o Cerrado começam ater uma outra origem. As culturas tradicionais, tipicamente associada as pequenas propriedades, têm decaído ao longo do tempo e estão cedendo lugar para modernas culturas mecanizadas como a soja, algodão e a cana-de-açúcar. Esta expansão da monocultura é considerada uma prática que tem maior potencial de

redução de biodiversidade.

O Cerrado brasileiro, ainda que considerado um dos biomas mais ricos em biodiversidade, é também um dos mais ameaçados do mundo (MMA, 2009). Tanto que em Myers et al. (2000) é citado como um dos *hospost* mundiais para a conservação da biodiversidade. Ou seja, a excepcional concentração de espécies endêmicas no Cerrado esta perdendo seu habitat.

O bioma está sendo rapidamente convertido em pastagem e cultivo agrícola. As características do Cerrado, como a de relevo suave com predomínio de chapadões, e o potencial de recursos hídricos associados aos incentivos governamentais através de programas de desenvolvimento como o Polocentro, Prodecer e Padap, resultaram em um intenso processo de ocupação do Cerrado nas últimas quatro décadas (SANO et al., 2002).

Segundo MMA (2009), o processo vertiginoso de ocupação do Cerrado principalmente a partir dos anos 1970, deu-se através do desenvolvimento de técnicas e tecnologias agrícolas, especialmente quanto à adubação do solo e ao surgimento de novas variedades de *commodities* mais adaptadas à região. Dessa forma, a agricultura mecanizada para produção de grãos e a pecuária foram e continuam sendo, dois dos vetores determinantes do desmatamento desta região.

Sano et al. (2008) estimaram os principais resultados do mapeamento de uso da terra do bioma Cerrado para o ano de 2002, tendo como base um outro trabalho realizado em 2007 (Tabela 6). Como se observa, cerca de 40% da área original do Cerrado (cerca de 80 milhões de hectares) já foram desmatados e transformados em pastagens cultivadas, culturas agrícolas

e outros tipos de uso. Do total desmatado cerca de 54 milhões de hectares (26,5% do bioma) estavam ocupados por pastagens cultivadas e 21,56 milhões de hectares (10,5% do bioma) por culturas agrícolas. A cobertura vegetal natural encontrada no bioma foi de 123,7 milhões de hectares (60,5% do bioma) (SANO et al. 2007).

**Tabela 6:** Classes de uso e ocupação do solo no Bioma Cerrado (em hectares).

| USO DA TERRA | ÁREA (ha) |
|---|---|
| Cultura agrícola | 21.559.571 |
| Pastagens cultivadas | 54.006.770 |
| Reflorestamento | 3.537.088 |
| Área com mineração | 7.870 |
| Áreas urbanas | 889.059 |
| Cobertura vegetal natural | 123.667.075 |

Fonte: SANO et al. (2007); SANO et al. (2008)
(ano-base: 2002; área total do Cerrado: 204,7 milhões de hectares)

A ocupação mais intensa e a conversão do Cerrado está concentrada na parte sul do Bioma (Figura 11). As rodovias que ligam a região ao Sul do Brasil facilitam o escoamento da produção e o acesso aos serviços. A maior parte da vegetação natural localizou-se na parte norte, mas o que se vê é que essa parte norte do Cerrado tem sido alvo da expansão agrícola para plantio de grãos, em especial no sul dos estados do Maranhão, Piauí e no norte do Tocantins. Na região Centro-Sul, o Triângulo Mineiro representa uma parcela expressiva do foco do desmatamento e do adensamento demográfico e é uma área em que os pastos estão cedendo lugar às usinas de cana-de-açúcar. Na região oeste da Bahia há a concentração do cultivo de soja (MMA, 2009).

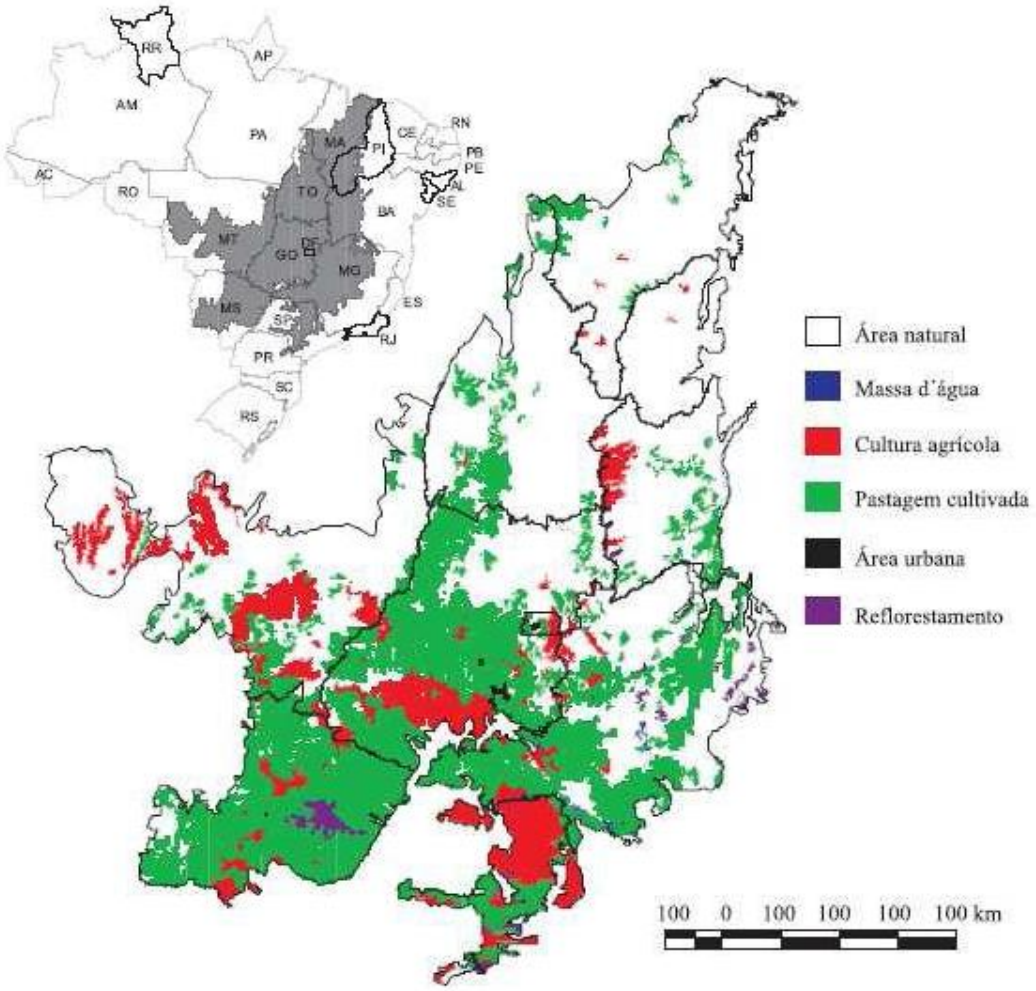



**Figura 11:** Distribuição espacial das classes de uso da terra no Bioma Cerrado referente ao ano de 2002.
Fonte: Sano et al. (2008)

O Programa de monitoramento do Desmatamento nos Biomas Brasileiros por satélite apresenta a situação mais atual do desmatamento do Cerrado. Entre 2002 e 2008 o Cerrado teve sua cobertura vegetal suprimida em 127.564 km², o que representa uma taxa anual de aproximadamente 21.300 km²/ano para esse período. Em 2002 o percentual de área desmatada no Cerrado que era de 41,9% subiu para 48,2% em 2008 (MMA, 2009).

# CAPÍTULO III

# MÉTODO E TÉCNICAS DA PESQUISA

# CAPÍTULO III

# MÉTODO E TÉCNICAS DA PESQUISA

A realização desta pesquisa foi norteada pelas informações geradas em trabalhos anteriores que demonstraram que a conversão de áreas naturais em sistemas cultivados resulta em mudanças da matéria orgânica do solo (teor, estoque e natureza do carbono orgânico) acompanhadas de modificações de outras propriedades e características como densidade, porosidade total, distribuição de macro/microporos, entre outras. Como consequência ocorrem mudanças relacionadas ao grau de desenvolvimento e estabilidade estrutural, disponibilidade de nutrientes, infiltração e retenção de água no solo, entre outras (FELLER; BEARE, 1997; CORAZZA et al., 1999; CERRI et al., 2007). Para atingir aos objetivos propostos foram cumpridas as seguintes etapas:

## 3.1. Mapeamento da evolução do uso e/ou ocupação do solo na área de pesquisa

A avaliação do uso do solo consiste em conhecer os usos atuais e pretéritos, antrópicos ou naturais do solo, imprescindíveis para o estudo de impacto, manejo e gestão (ROSA, 2007). A Fazenda Cachoeira se situa em uma área originalmente coberta por Cerrado que foi progressivamente sendo convertida em cultivos e pastagem. Foram analisadas fotografias aéreas (1979) e imagens dos satélites TM LandSat-5 (2000) RapidEye (2010) e elaborados mapas temáticos multitemporais, do período entre 1979, 2000 e 2010, indicando a variabilidade e sucessão dos diferentes usos da terra, focando as áreas nas quais foram coletadas as amostras de solo: [1] Cerrado – tipo Cerradão, [2] Sistema Misto = Agricultura + Pastagem 15 anos, e [3] Pastagem 30 anos.

Associado ao mapeamento multitemporal, obtido pelas imagens de satélite e fotos aéreas, informações sobre a conversão e as técnicas de manejo adotadas desde o desmatamento do Cerrado foram repassadas em comunicação oral pelo Sr. Hacker, proprietário da Fazenda Cachoeira desde 1975.

### *3.1.1. Materiais utilizados*

As principais fontes de dados geográficos no Brasil são disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Diretoria do Serviço Geográfico (DSG). Outros institutos e órgãos, principalmente governamentais, também disponibilizam uma série de dados e informações geográficas que foram utilizados para subsidiar a elaboração do presente trabalho, cita-se o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMPRAPA), a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), o serviço de Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE GeoMINAS), o Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM). O formato de dados geográficos é classificado em modelos matriciais (raster) e modelos vetoriais (vetores). Ambos os formatos foram usados neste trabalho:

Dados Vetoriais

- Malhas digitais da drenagem regional, disponíveis no sítio do IGAM;
- Malhas digitais das rodovias, sedes e limites municipais, disponíveis no sítio do IBGE.

Dados Matriciais:

- Carta Planialtimétrica e de limites/confrontações da Fazenda Cachoeira, Escala 1:25.000, elaborado por FRANCO, J.B.S. (sem especificação de ano);
- Cartas topográficas da Diretoria de Serviços Geográficos do Exército Brasileiro (DSG) na escala de 1: 25.000 da área de estudo, disponíveis no Laboratório de Cartografia e Sensoriamento Remoto do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia (LACAR/IG/UFU), datadas do ano de 1984 (Folha SE-22-Z-D-II-2-NE - Cachoeira do Panga e Folha SE-22-Z-D-II-2-SE - Córrego da Estivinha);
- Fotografias Aéreas publicadas pelo IBC/GERCA, disponibilizadas em formato digital pelo Laboratório de Cartografia e Sensoriamento Remoto do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia (LACAR/IG/UFU): Faixa 22 A: 100436, 100437, 100438; Faixa 25: A 100483, 100484; Faixa 23 A 100274, 100275, 100276;
- Imagens TM/Landsat de 5 de novembro de 2000, ponto 221/órbita 73, disponibilizada no sítio <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/> do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011).
- Imagens RapidEye/AG sensor REIS de junho de 2010, 2 cenas 2230325 e 2230225, cedidas pelo Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais ao Laboratório de Cartografia e Sensoriamento Remoto do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia (LACAR/IG/UFU), já ortorretificadas.

### *3.1.2. Procedimentos Operacionais*

Inicialmente, as fotografias aéreas do IBC/GERCA, as imagens TM/Landsat5 e as imagens RapidEye/AG foram registradas e/ou tiveram o seu registro atualizado no Software SPRING 5.2.6 (Software de SIG livre, disponível no site do INPE), tomando como referência as cartas topográficas editadas e publicadas pela Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) na escala de 1:25.000. A figura 12 mostra a articulação das Cartas utilizadas – Córrego do Panga (SE-22-Z-D-II-2-NE) e Córrego da Estivinha (SE-22-Z-D-II-2-SE), que abrangem a área da Fazenda Cachoeira.

A correção geométrica foi realizada no intuito de definir e incorporar as imagens em um sistema de projeção cartográfica e, possibilitar a atribuição de coordenadas geográficas comuns a elas. Destaca-se a utilização do Datum horizontal *South American Datum* (SAD 1969) e o sistema de projeção cartográfica *Universal Transverso de Mercator* (UTM) – Fuso: 22 – Hemisfério: Sul – Unidade: Metros.

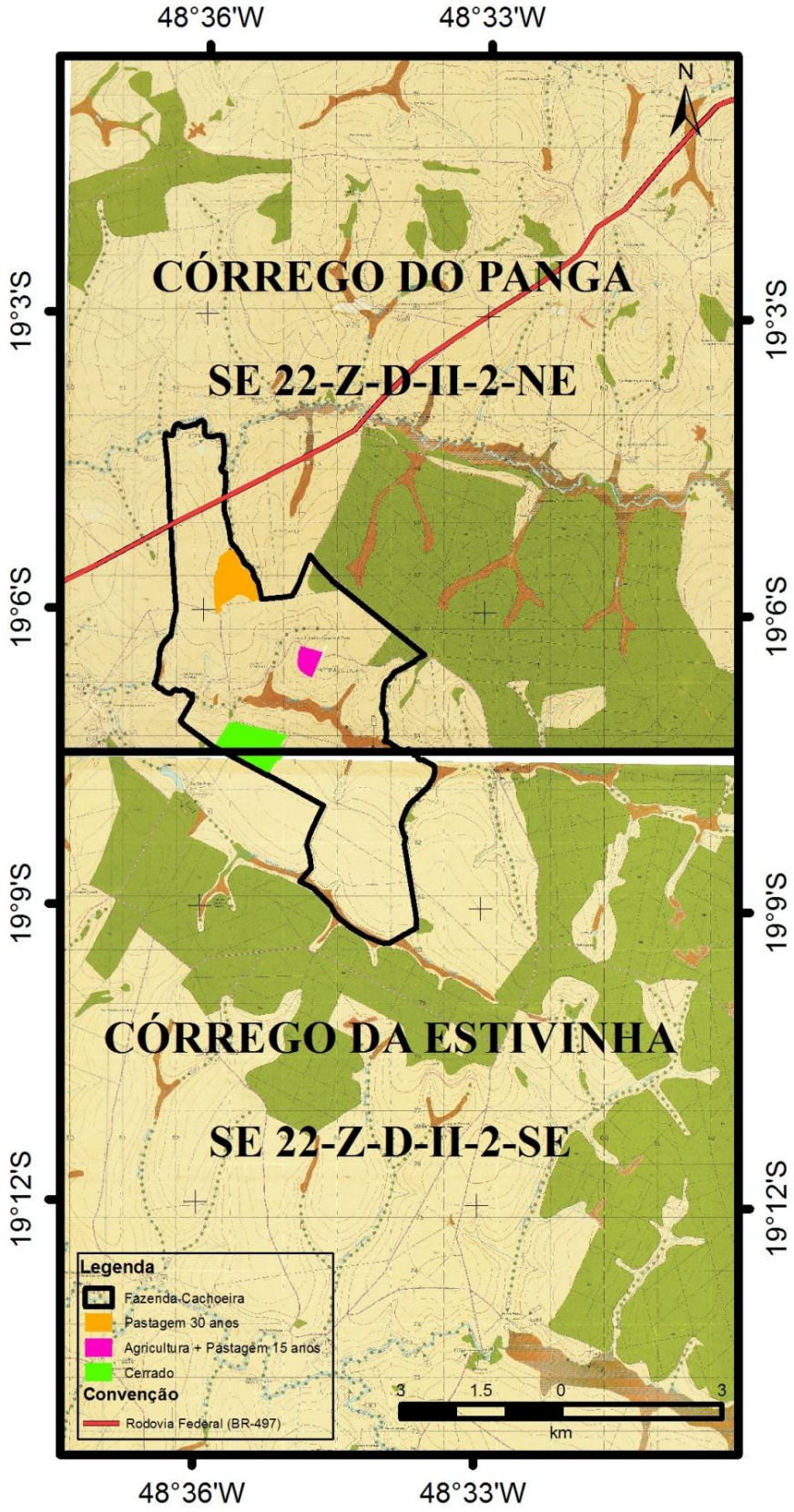



**Figura 12:** Articulação das Cartas Militares, publicadas pela Diretoria de Serviços Geográficos do Exército - DSG (1984) – Fazenda Cachoeira.

Posteriormente foi gerado Composições Coloridas para as imagens de satélites TM/Lansat e RapidEye/AG. Adotou-se para as imagens TM/Lansat5 as bandas 3 (0,63 - 0,69μm), 4 (0,76 - 0,90μm) e 5 (1,55 - 1,75μm), na sequência RGB. Já para as imagens RapidEye foi utilizada a composição BGR para as bandas (Red– 630 a 690 μm), Green (520 a 590 μm); NearIR (0,76 - 1,2 μm). Após geração da Composição Colorida, foi aplicada uma técnica de Contraste no SPRING 5.2.6, usando o método de equalização do histograma para as imagens TM/Landsat e Rapideye.

No software ENVI 4.7, disponível no Laboratório de Informática do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, os limites da área de pesquisa foram vetorizados a partir da Carta Planialtimétrica e de limites/confrontações da Fazenda Cachoeira. O arquivo gerado foi usado como máscara para o recorte das fotografias aéreas e imagens de satélite. Em sequência foi realizada a Mosaicagem das cenas (tanto das imagens de satélite, quando das fotografias aéreas) que integram os limites da área, com o objetivo de unir em uma única imagem dois ou mais extratos ou cenas de imagens.

O mosaico das imagens RapidEye é formado por cenas de 625 km². A área de pesquisa ocupa parte de 2 cenas (2230325 e 2230225). As cenas utilizadas bem como a área de estudo e os pontos de coleta das amostras de solo podem ser vistas na Figura 13.

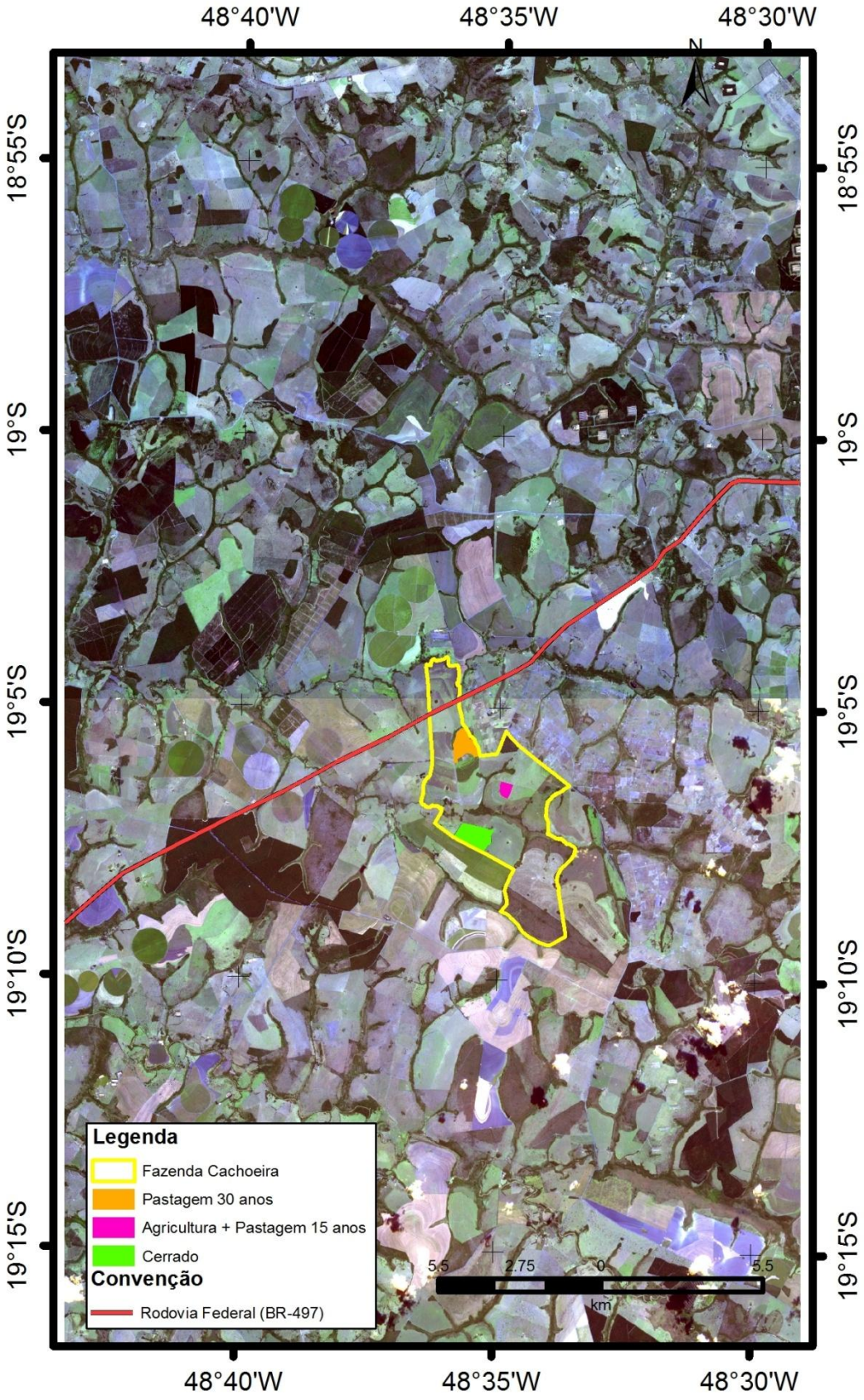



**Figura 13:** Área de estudo obtida através dos recortes das cenas (2230325 e 2230225) das imagens RapidEye (2010), composição colorida BGR.

Por fim, no software Arcmap 10.1, também disponível no Laboratório de Informática do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, através da ferramenta *Projections and Transformatios* do pacote *ArcToolBox*, os arquivos foram redefinidos para o Datum horizontal *Sistema de Referência Geocêntrico para as América*s (SIRGAS, 2000), mantendo o sistema de projeção cartográfica *Universal Transverso de Mercator* (UTM) – Fuso: 22 – Hemisfério: Sul – Unidade: Metros.

Foi então definida as áreas pré-selecionadas para avaliação multitemporal – 3 diferentes categorias de uso, usados como pontos de coleta das amostras de solo: [1] Cerrado – tipo Cerradão, [2] Sistema Misto = Agricultura + Pastagem 15 anos, e [3] Pastagem 30 anos. Realizou-se a Interpretação Visual em Tela de computador da variabilidade das categorias nos anos de 1979, 2000 e 2010, em escala 1: 5.000. Os mapas foram gerados no software Arcmap 10.1 e exportados para formato jpg.

Todo mapeamento foi no Laboratório de Cartografia e Sensoriamento Remoto no Instituto de Geografia - UFU.

**3.2. Amostragem de solo**

Na Fazenda Cachoeira foram escolhidas 3 áreas para coleta de amostras de solo: [1] Cerrado – do tipo Cerradão (CN), [2] Sistema Misto = Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem 30 anos (P30) (Tabela 7 e Figura 14).

**Tabela7:** Categoria de uso e/ou ocupação do solo em cada ponto de coleta na área de pesquisa – Fazenda Cachoeira (2012).

| **Pontos de coleta** | **Coordenadas UTM** | | **Altitude (metros)** | **Uso e/ou Ocupação do solo** |
|---|---|---|---|---|
| | **mE** | **Mn** | | |
| **Ponto 1** | 753.040 | 7.884.194 | 735 | Cerrado (CN) = Fragmento de vegetação natural comportando vegetação do tipo Cerradão preservado. |
| **Ponto 2** | 754.350 | 7.885.653 | 754 | Sistema Misto (Agric+P15) = Área convertida inicialmente ao uso agrícola e nos últimos 15 anos pastagem cultivada. |
| **Ponto 3** | 752.826 | 7.886.453 | 762 | Pastagem 30 anos (P30) = Área de pastagem cultivada com a gramínea *Bachiaria ruzizienses* há 30 anos. |

O ponto de coleta [1] corresponde a uma área de remanescente de Cerrado Arbóreo Denso (Cerradão), que nunca foi desmatado nem queimado e corresponde à Reserva Legal da propriedade. O ponto de coleta [2] trata-se de uma área que começou a ser desmatada, por volta de 1979/80. O corte do Cerrado foi feito gradativamente, ao longo de 10 anos. Durante essa década, existia na área um Cerrado – Campo Sujo. Após esse período, foi estabelecido nessa área o cultivo de arroz, seguido pela soja, sendo posteriormente estabelecida a pastagem há 15 anos. O ponto de coleta [3] também é uma área de pastagem cultivada, porém foi implantada há mais de 30 anos (Quadro 1).

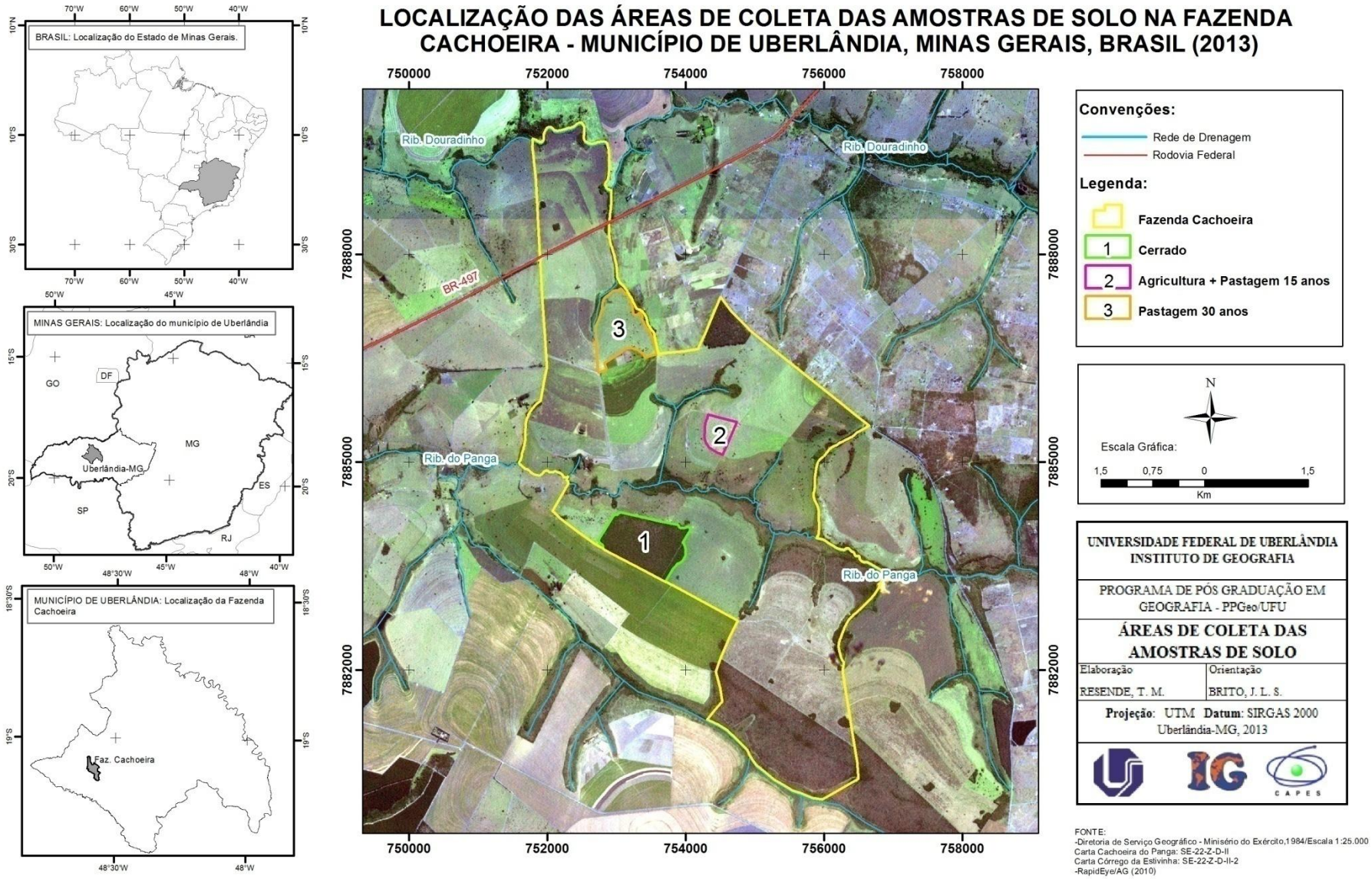



**Figura14:** Localização dos pontos de coleta das amostras de solo – Fazenda Cachoeira, município de Uberlândia, Estado de Minas Gerais, Brasil (2013).

**Ponto de Coleta 1:** Fragmento de vegetação natural – 'Cerradão' preservado
(53.040 E / 7.884.194 N)

**Ponto de Coleta 2:**Sistema Misto – Agricultura + Pastagem cultivada há 15 anos
(754.350 E / 7.885.653 N)

**Ponto de Coleta 3:** Área de pastagem cultivada há 30 anos
(752.826 E / 7.886.453 N)

**Quadro 1:** Fotos das categorias de uso e/ou pontos de coleta das amostras de solo na Fazenda Cachoeira, município de Uberlândia, Estado de Minas Gerais, Brasil.
Fonte: Trabalho de campo realizado em Abril de 2012
Autora: Resende, T. M.

O histórico de uso e manejo do solo adotados estão apresentados no tópico *4.1 (Evolução do uso do solo na área de estudo)* em Resultados e Discussões.

Em cada categoria de uso foram abertas 4 trincheiras e coletadas amostras em 3 profundidades, totalizando 12 amostras por categoria de uso, ou seja, 36 amostras somando as três categorias analisadas. As amostras foram coletadas em abril de 2012. Os pontos de coleta foram georreferenciados com GPS (*Garmin Etrex Vista*).

Em cada trincheira foram coletadas amostras de solo na superfície entre 0 e 15 cm e em subsuperfície, entre 15 e 30 cm e entre 30 e 60 cm (Figura 15). A profundidade escolhida deveu-se ao fato de que os maiores teores de carbono orgânico encontram-se estocados na superfície do solo e que o desmatamento e perda por mineralização se refletirão de forma mais rápida e acentuada nas camadas superficiais (BERNOUX et al., 2002). Além disso, as atividades agrícolas têm forte influência nessas profundidades.

**Figura15:** Trincheiras para coleta das amostras de solo nas profundidades 0-15 cm, 15-30 cm e 30-60 cm.

Após as coletas, as amostras foram secas inicialmente em condições ambientais de laboratório e, posteriormente, colocadas em estufa com temperatura de 30°C por 24 horas. Em seguida

foram destorroadas, homogeneizadas e passadas em peneira de 2 mm para obter a fração terra fina.

Para determinação da densidade do solo, informação essencial para o cálculo do estoque de carbono total do solo e para o cálculo da macro e microporosidade e porosidade total do solo, foram coletadas amostras de solo indeformadas, nas mesmas profundidades. Para coleta das amostras indeformadas foi utilizado um extrator de solo de Uhand (1949) ou similar contendo anel volumétrico de metal com dimensões e volumes previamente conhecido (OLIVEIRA, 1961) (Figura 16).

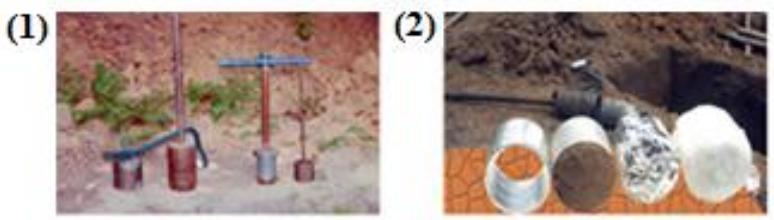



**Figura16:** (1) Coletor de amostras de solo indeformadas tipo Uhland e (2) Amostras indeformadas em anéis volumétricos.

Considerando que em todas as áreas de coleta a topografia foi similar (variando de 750 a 762 metros), as amostras foram coletadas nas posições topográficas de meia encosta evitando ampliar a influência topográfica e de drenagem do solo sobre a matéria orgânica.

## 3.3. Análises

### *3.3.1. Análise Textural*

Nesta pesquisa a análise textural foi importante visto que a textura influencia diretamente na concentração de carbono no solo. A análise textural das amostras coletas em campo foi

realizada no Laboratório de Manejo de Solos do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) segundo o método de peneiramento e pipetagem em frações padronizadas proposto no Manual de Métodos de Análise de solo (EMBRAPA, 1997).

A análise textural do solo é realizada em três etapas: aplicação de pré-tratamentos para remoção de agentes cimentantes e floculantes, dispersão da amostra de solo e quantificação das frações do solo (GEE; BAUDER, 1986).

Inicialmente, realizou-se o peneiramento seco, retirando os materiais grosseiros. Em uma alíquota de 10 gramas de solo (TFSA) foi adicionado 50 ml de hidróxido de sódio (NaOH) como solução dispersante. Agitou-se mecanicamente em mesa agitadora orbital por 12 horas a 42 rpm.

A suspensão foi peneirada em abertura de malha de 0,210 mm para separar a fração areia grossa, e em malha 0,053 mm para separar areia fina, que posteriormente foram pesadas. O material restante foi colocado em uma proveta, sendo aferida com água destilada até 1.000 ml, para determinação das frações argila e silte pelo método da pipeta. Foi feita uma agitação mecânica durante 30 segundos e, decorridos os tempos estabelecidos, procedeu-se às pipetagens do silte e da argila. As alíquotas pipetadas foram colocadas em cápsulas de porcelanas e levadas à estufa para secagem à 105ºC por 24 horas, sendo posteriormente pesadas (EMBRAPA, 1997). As classes estabelecidas para as frações granulométricas foram: areia grossa (partículas entre 2 e 0,2 mm), areia fina (entre 0,21 e 0,05 mm), silte (entre 0,051 e 0,002 mm) e argila (< 0,002 mm).

### *3.3.2. Cálculo da Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi) e Porosidade total (Pt) do Solo*

Para determinação da macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) do solo foram utilizadas as amostras com estrutura indeformada. A determinação da macro e microporosidade foram feitas empregando-se uma mesa de tensão sugerida por Leamer e Shaw (1941) modificada. Esse aparelho é usado para determinar, pelo método de pressão negativa, os vários conteúdos de umidade de um bloco de solo, previamente saturado, pela aplicação de tensões correspondentes a colunas d'água de 20 até 100 centímetros de altura. A simples determinação da porosidade total do solo realizada pelo método clássico, através dos valores da matéria sólida e do peso específico real, não exprime a condição de aeração efetiva do solo. As determinações denominadas de macro e microporosidade vieram caracterizar melhor a correlação entre os espaços de poros denominados de "grandes poros" (macro) e "pequenos poros" (micro) (OLIVEIRA, 1968).

A porosidade total corresponde à soma da porosidade capilar (microporosidade) da porosidade não capilar (macroporosidade) (ARENA, 1945). Os valores limites entre a macro e microporosidade vêm sendo estudados e sugeridos por vários autores. Nelson e Bayer (1940) empregaram o valor de 40 cm de tensão, obtendo ótima correlação entre os poros drenados, a percolação e estrutura do solo. Peele (1949), Uhland (1949), VanDoren (1949) e Grohmann (1960) utilizaram a tensão de 60 cm como limite entre a macro e a microporosidade e que corresponde a poros de diâmetros da ordem de 0,05 mm. Uhland (1949) Peele (1949) e Thorne (1949), realizando estudos sobre percolação em amostras com estrutura indeformada, também aplicaram 60 cm de tensão, na avaliação da macroporosidade.

Neste estudo considerou-se o valor da macroporosidade aquele obtido com a tensão correspondente a uma coluna d'água de 60 cm de altura.

Assim, amostras indeformadas e saturadas foram pesadas (PSat) e posteriormente colocadas sob a mesa de tensão, sendo exercida uma tensão de 60 cm de coluna d'água, suficiente para retirar a água dos macroporos (≥ 0,05 mm). Ao cessar a drenagem por efeito da tensão, as amostras foram pesadas (P60) e levadas para estufa a 105°C. Após 24 horas, foram novamente pesadas e determinado o peso do bloco seco (PSE). O volume de macro e microporos contidos na amostra é obtido a partir dessas determinações (EMBRAPA, 1997).

O cálculo para determinação dos macroporos (Ma) e microporos (Mi) é representado pelas equações abaixo:

$$Ma = \frac{\mathrm{PSat} - \mathrm{P60}}{\mathrm{V}} \quad (2)$$

$$Mi = \frac{\mathrm{P60} - \mathrm{PSE}}{\mathrm{V}} \quad (3)$$

Onde:

Ma = Macroporosidade (em $cm^3/cm^3$)

Mi = Microporosidade (em $cm^3/cm^3$)

PSat = Peso do solo saturado (g)

P60 = Peso da amostra após ser submetida a uma tensão de 60 cm de coluna d'água (g)

PSE = Peso da amostra seca a 105°C (g)

V = Volume do cilindro ($cm^3$)

E  por fim, a porosidade total foi calculada a partir da equação 4:

$$Pt = \mathrm{Mi} + \mathrm{Ma} \quad (4)$$

Onde,

Pt = Porosidade Total (em $cm^3/cm^3$)

Mi = Microporosidade

Ma = Macroporosidade

### *3.3.3. Cálculo da Densidade do Solo (Ds)*

A densidade do solo (Ds) é uma das características importantes na avaliação dos solos por estar associada à estrutura, ao tamanho das partículas e à porosidade do solo, podendo ser usada como uma indicadora de processos de degradação da estrutura do solo, que pode mudar em função do uso e manejo do solo e níveis de compactação e/ou adensamento, importantes para o cálculo do estoque de carbono do solo.

A densidade é definida como a relação entre a massa de sólidos secos do solo e seu volume indeformado (Equação 5), tendo como unidades de medida, no sistema internacional, $kg/m^3$ ou $g/cm^3$.

$$Ds = \frac{\mathrm{Ms}}{\mathrm{Vs}} \quad (5)$$

Onde, Ds é a densidade do solo; Ms corresponde a massa do solo seco; e Vs é o volume do solo indeformado.

O método usual para determinação da Ds envolve a obtenção de uma amostra de volume conhecido por meio de anéis volumétricos inseridos no solo com o uso de equipamento apropriado. A massa da amostra é obtida por pesagem em balança analítica após remoção da umidade em estufa a 105°C até peso constante. Esse método, denominado "Método do anel volumétrico", é o mais usado em trabalhos de avaliação da densidade de solo (BLAKE; HARTGE, 1986; EMBRAPA, 1997).

### *3.3.4. Análise do Carbono Orgânico Total (%C) e do Isótopo de Carbono ($\delta^{13}C$)*

Para determinação do carbono orgânico total (%C) e do isótopo de carbono ($\delta^{13}C$), as amostras de solo foram secas a 50°C, removendo todos os resíduos vegetais. Qualquer material vegetal remanescente foi removido por flotação em HCl 0,01 M e, posteriormente, peneiramento em 210μm. O valor isotópico do carbono ($\delta^{13}C$) e o carbono orgânico total (%C) foram determinados usando um analisador *Carlo Erba Elemental Analyser* CHN-1110, acoplado a um espectrômetro de massa *Thermo Finnigan, Delta Plus*. As análises foram realizadas no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo (USP). As incertezas analíticas foram de 0,3‰ para o $\delta^{13}C$. Os teores de carbono orgânico total são expressos em percentagem de solo seco (%C) e o valor isotópico do carbono em $\delta^{13}C$ ‰ (por mil) em relação a referência internacional *PDB.*

Para a análise e estudo da dinâmica da matéria orgânica do solo (%C e $\delta^{13}C$) aplicou-se a metodologia de utilização de isótopos estáveis do carbono baseada na variação da abundância isotópica natural de $^{13}C$. Este método baseia-se na variação da abundância natural de um material experimental induzido por um fracionamento isotópico durante processos biológicos,

químicos e físicos. Tais variações são comparadas a padrões estabelecidos internacionalmente.

Esta técnica tem sido empregada com sucesso em vários estudos em regiões tropicais para estudar a dinâmica do C da MOS em longo prazo. Diferentes modelos têm sido utilizados nesses estudos – Modelo de mistura simples padrão; Modelo de Cadisch e Giller (1996); Modelo de Balesdent, Mariotti e Boisgontier (1990). O modelo utilizado na presente pesquisa foi o de Mistura Simples Padrão, considerado como o modelo clássico nos estudos de abundância natural de $^{13}C$. Este modelo é utilizado quando a vegetação original é substituída por uma cultura de ciclo fotossintético diferente. Assim, é necessário conhecer a composição isotópica ($\delta^{13}C$) da MOS inicial do solo, ou seja, sob vegetação nativa ou original e sob a cultura agrícola cultivada após a retirada dessa vegetação. Caso não se tenha a amostra de solo do início do experimento, é necessário retirar amostras em uma área com remanescentes da vegetação nativa, que represente a condição original. Nos casos onde é necessário amostrar uma área referência é importante avaliar, além do $\delta^{13}C$ no perfil do solo, parâmetros como textura do solo e densidade, especialmente das camadas mais profundas, para certificar a uniformidade do solo entre as áreas, mesmo que estejam sob a mesma classe de solo.

O desenvolvimento da metodologia do emprego do $^{13}C$ como traçador natural é mais recente que a da marcação artificial com $^{14}C$. Determinações da abundância natural do $^{13}C$ foram introduzidas no estudo da dinâmica da matéria orgânica do solo onde ocorreram alterações antigas ou recentes da cobertura vegetal (CERRI et al., 1985). A espectrometria de massa é o método mais preciso para a determinação de pequenas variações (<1‰) na abundância natural. O carbono das amostras tem que ser completamente convertido a $CO_2$ para a determinação do $^{13}C$.

Vale ressaltar que a abundância natural dos isótopos mais pesados é geralmente muito baixa; dessa forma, convém expressá-la em ‰ (por mil) em relação ao padrão, usando a notação delta (δ) (Equação 6).

$$\delta‰ = \left(\frac{R\ amostra}{R\ padrão} - 1\right) * 1.000 \quad (6)$$

Em que,

δ = abundância natural dos isótopos;
R = relação isotópica $^{13}C$ /$^{12}C$.

O padrão usado na determinação do $\delta^{13}C$ é o *PDB*, um carbonato (*Belemnita americana*) da formação *Pee Dee* da Carolina do Sul (EUA), segundo a equação abaixo:

$$\delta^{13}C = \left(\frac{\frac{^{13}C}{^{12}C}\ amostra}{\frac{^{13}C}{^{12}C}\ padrão} - 1\right) * 1.000 \quad (7)$$

Em que, $\delta^{13}C$ = abundância natural do isótopo $^{13}C$.

O $\delta^{13}C$ do $CO_2$ atmosférico é próximo a -7‰ *PDB*. Esse valor decresce para -9 a -40‰ *PDB* em plantas superiores, conforme seu ciclo fotossintético. As plantas do ciclo $C_4$ apresentam concentrações mais elevadas de $^{13}C$, com valores entre -12 a -9‰ *PDB*, enquanto as plantas do ciclo $C_3$ tem $\delta^{13}C$ entre -34 a -22‰ *PDB*. A composição isotópica média do $^{13}C$ da matéria orgânica do solo reflete a da vegetação ou sucessão de vegetações que a produziram (DEINES, 1980).

Finalmente, diante das alterações verificadas na dinâmica do carbono a partir da introdução de pastagem em áreas originalmente cobertas pela vegetação de Cerrado foi apresentada uma análise das potencialidades de cada área estudada com relação ao ganho ou perda de carbono, a fim de subsidiar os proprietários rurais à adoção de melhores práticas de uso e manejo, buscando excelência na gestão das áreas ocupadas pela pecuária.

### *3.3.5. Determinação do Estoque de Carbono (Est.C)*

A conversão de ecossistemas naturais para sistema cultivado pode exercer uma grande influência no destino do carbono (C) estocado nos solos. Mudanças no uso da terra alteram os processos biogeoquímicos do solo, com reflexos no estoque de C e no fluxo de gases entre o solo e a atmosfera. Dependendo das características da área e do sistema de manejo adotado, essas alterações podem representar uma mudança no papel do solo como reservatório de C, alterando as taxas de emissão de dióxido de carbono ($CO_2$) e metano ($CH_4$). As emissões líquidas desses gases estão associadas com as mudanças nas quantidades do C estocado.

O cálculo de estoque de carbono considera não somente valores de concentração (teor), mas as alterações da densidade e espessura da camada estudada, sendo os resultados expressos por unidade de área – Mg/ha de C (TIESSEN et al., 1982; AGUILAR et al., 1988).

Assim, os estoques de C de cada uma das camadas, em todas as áreas estudadas, são calculados pela expressão (VELDKAMP, 1994):

$$Est.C = \frac{(\mathrm{CO} * \mathrm{Ds} * \mathrm{e})}{10} \qquad (8)$$

Onde:

Est C = estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg/ha)

CO = teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g/kg)

Ds = densidade do solo da profundidade (kg/dm$^3$)

e = espessura da camada considerada (cm)

Entretanto, recentemente, esse cálculo foi considerado insuficiente, pois as práticas de manejo podem alterar a densidade do solo e, assim, ao se considerar uma mesma profundidade de uma área cultivada e de uma área sob vegetação nativa, as massas de solo serão diferentes, podendo levar a interpretações equivocadas (VELDKAMP, 1994; JANTALIA et al., 2006).

Dessa forma, neste trabalho, após o cálculo pela densidade do solo, foi utilizada uma fórmula matemática para correção dos estoques de C levando-se em conta as diferenças nas massas equivalentes de solo. Essa fórmula foi utilizada por Sisti et al. (2004), baseada nos trabalhos de Ellert e Bettany (1995).

$$Cs = \sum_{i=1}^{n-1} \mathrm{Cti} + \left[ \mathrm{Mtn} - \left( \sum_{i=1}^{n} \mathrm{Mti} - \sum_{i=1}^{n} \mathrm{Msi} \right) \right] * \mathrm{Ctn} \qquad (9)$$

Onde,

Cs = estoque de C total, corrigido em função da massa de solo de uma área de referência;

∑ Cti = somatório dos estoques de C do solo da primeira à penúltima camada amostrada, no tratamento considerado (Mg/ha);

Mtn = massa do solo da última camada amostrada no tratamento (Mg/ha);

∑ Mti = somatório da massa total do solo amostrado sob o tratamento (Mg/ha);

$\sum$ Msi = somatório da massa total do solo amostrado na área de referência (Mg/ha);

Ctn = teor de C do solo na última camada amostrada (MgC/Mg de solo).

A equação para correção dos estoques de C para uma mesma massa de solo é muito importante quando se deseja comparar os efeitos de diferentes tipos de manejo de solo em relação a uma área de referência. Porém, neste trabalho a diferença encontrada entre os valores foi mínima, sendo, portanto, desconsiderada.

O estoque de C de um solo representa o balanço dinâmico entre a adição de material vegetal morto e a perda pela decomposição ou mineralização (SCHOLES et al., 1997). O conhecimento dos valores de Est.C nos solos a partir de um sistema de referência permite avaliar o impacto da implantação de sistemas cultivados no solo e no ambiente.

### *3.3.6. Cálculo do Carbono derivado da vegetação $C_3$ e Carbono derivado da vegetação $C_4$*

Onde a mudança de uso da terra teve alteração de espécies de plantas $C_3$ para $C_4$, ou o inverso, o modelo de 'dois compartimentos simples' pode ser usado para estimar a proporção (Ft) de carbono no solo derivado da vegetação original (nativa) e derivado da nova vegetação. Após um determinado tempo de transição (t) entre dois estados, A (estado estável sob vegetação A) e B (estado estável sob vegetação B), o solo é caracterizado pelo valor de $\delta^{13}C$ ($\delta t$). Se o $\delta^{13}C$ do solo inicial ($\delta A$) e o $\delta^{13}C$ do solo final ($\delta B$) são conhecidos, um modelo de mistura rigoroso dos compartimentos A e B pode ser usado para dar o $\delta t$ como função de $\delta A$, $\delta B$ e Ft (Equação 10) (BERNOUX et al., 1998b).

$$\delta t = Ft * \delta B + (1 - Ft) * \delta A \quad (10)$$

Sendo que Ft pode ser calculado como:

$$Ft = \frac{\delta t - \delta A}{\delta B - \delta A} \quad (11)$$

Em qualquer lugar e momento, tanto δA e δB não pode ser diretamente mensurado, tendo que ser estimado. Muitos autores têm assumido o δA para ser igual ao solo de um local de referência $\delta^{13}C$ (δref) com tipo de solo similar e topografia mantida sob o uso inicial da terra. Para δB, geralmente não existe referência que tenha apoiado a vegetação do tipo B durante um tempo suficiente para dar valores de referência a δB.

Alguns autores têm usado valores de $\delta^{13}C$ derivado de partes selecionadas de plantas vivas (raízes ou material foliar) ou da liteira da nova vegetação como estimativa de δB (DESJARDINS et al., 1994). Balesdent et al. (1993) apresentou que, para Florestas Temperadas, os valores de $\delta^{13}C$ da MOS estão relacionadas com os valores de $\delta^{13}C$ de folhas corrigido pelo $\log^{10}$ da concentração de carbono no solo. Uma hipótese mais simples seria a de que a mudança isotópica da liteira da MOS durante a humidificação não é sensível para composição isotópica absoluta da vegetação. Isso significa que a δB – δA pode ser aproximada pela diferença do valor de $\delta^{13}C$ da vegetação A e B, ou da liteira sob vegetação A e B, como:

$$Ft = \frac{(\delta t - \delta ref)}{\Delta\delta} \quad (12)$$

Onde:

$$\Delta\delta = (\delta\text{vegB} - \delta\text{vegA}) \text{ ou } (\delta\text{litB} - \delta\text{litA}) \quad (13)$$

A maioria dos estudos utilizava estimativas baseadas nos valores médios de $\delta^{13}C$ de diferentes partes das plantas, com ou sem liteira. Skjemstad et al. (1990) assumiu os valores médios de $\delta^{13}C$ das entradas sendo a média das folhas, caule, raiz e tronco para a camada superficial (0-7,5 cm) e sendo a média de todas as raízes amostradas no caso das camadas mais profundas.

Uma vez que Ft foi calculado, é possível estimar o conjunto da fração de carbono derivado da nova vegetação ($CB_t$), e do restante da vegetação anterior ($CA_t$):

$$\text{CA}_t = (1 - \text{Ft}) * \text{CT}_t \quad (14)$$

$$\text{CB}_t = Ft * \text{CT}_t \quad (15)$$

O estoque de carbono do solo e os valores de $\delta^{13}C$ foram usados para calcular as frações de $CA_t$ e $CB_t$ para cada ponto ao longo da cronossequencia. Estes dados serviram como ponto de partida para testar os diferentes modelos existentes para cálculo do carbono derivado da vegetação $C_3$ lábil e estável.

### *3.3.7. Cálculo do Carbono derivado da vegetação nativa $C_3$ estável ($C_3$-estável) e biodegradável ($C_3$-lábil)*

O '*turnover'* da matéria orgânica do solo pode ser quantificada usando estudos de cronossequencias onde uma série de sítios de diferentes idades desde a mudança no uso da terra, mas similar em termos de solo e topografia, são substituídas para um sítio sob observação contínua de longo prazo (CERRI et al., 1985; VELDKAMP, 1994; FEIGL et al., 1995; MORAES et al., 1996).

Uma cinética do tipo exponencial é usada para calcular a taxa de perda da matéria orgânica do solo derivada da vegetação original e a taxa de aumento da matéria orgânica do solo da vegetação nova, pois a matéria orgânica do solo é uma mistura de componentes orgânicos variando de muito lábil para extremamente refratário, $CA_t$ e $CB_t$ podendo ser separado em frações que se diferem pela susceptibilidade à degradação. Geralmente, só duas frações são consideradas: a fração relativamente estável ($CA_{St}$ e $CB_{St}$) e outra relativamente lábil ($CA_{Lt}$ e $CB_{Lt}$) (JENKINSON; RAYNER, 1977; PARTON et al., 1987; ANDREUX et al., 1990). A escolha das equações para a cinética descrevendo a dinâmica de $CA_t$ e $CB_t$ e suas subdivisões é arbitrária e ajustada dependendo do número de pontos na cronossequencia. A equação exponencial geralmente usada é:

$$\mathrm{CA_t} = \mathrm{CA_L}\exp(-K_{AL}\,.\,t) + CA_S\exp(-K_{AS}\,.\,t) \qquad (16)$$

$$\mathrm{CB_t} = \mathrm{CB_L}\,(1-\exp(-K_{BL}\,.\,t)) + CB_S\,(1-\exp(-K_{BS}\,.\,t)) \qquad (17)$$

Onde $CA_L$ e $CA_S$ são as frações lábil e estável, respectivamente, de CA na origem (t=0). Eles declinam em uma taxa caracterizada pelos coeficientes $K_{AL}$ e $K_{AS}$. $CB_L$ e $CB_S$ são as frações lábil e estável, respectivamente, de CB quando o novo estado de equilíbrio é atingido (teoricamente para tempo infinito sob vegetação B). Eles declinam a taxa $K_{BL}$ e $K_{BS}$, respectivamente.

Os oito coeficientes desconhecidos das equações são obtidos por ajuste não linear dos dados utilizando o critério do menor erro quadrático médio. Autores usam diferentes simplificações e hipóteses para reduzir o número de coeficientes estimados. Arrouays et al. (1995) considerou que as taxas de caracterização das frações lábeis $K_{AL}$ e $K_{BL}$ são a mesma ($K_L$), e que $K_{AS}$ e $K_{BS}$ são iguais $K_S$, reduzindo o número de parâmetros para seis. Assume-se que o compartimento de matéria orgânica do solo derivado da vegetação A ou B tinha o mesmo grau de labilidade. Arrouays et al. (1995) encontrou que a fração lábil tem o tempo médio de residência (MRT) de 2,6 anos e a fração estável tem tempo de residência de 45,5 anos na camada lavrada. Portanto, quando o sistema resultante envolve poucas dezenas de anos, pode-se assumir que a fração mais estável são invariantes ao longo do período, em que $K_{AS}$ e $K_{BS}$ são consideradas iguais a zero.

Cerri e Andreux (1990), Andreux et al. (1990), Fernandes (1993), Moraes et al. (1996) consideraram $CA_S$ sendo invariável. Eles assumem que a nova matéria orgânica introduzida no solo é a única fração (CB) usando a equação simplificada com somente cinco parâmetros:

$$\mathrm{CA_t} = CA_S + CA_L \exp(-K_{AL} \, . \, t) \tag{18}$$

$$\mathrm{CB_t} = CB \, (1 - \exp(-K_B \, . \, t)) \tag{19}$$

Os valores para os parâmetros das equações foram determinados por meio de regressão não linear, com base em um algoritmo de busca interativa (Método *Levenberg-Marquardt)* que minimizou a soma dos quadrados residual (STATGRAPHICS PLUS, 1992).

Neste trabalho foram usadas as equações 18 e 19, propostas pelos últimos autores, para determinar o carbono derivado da vegetação $C_3$ (vegetação nativa) lábil e estável e o carbono derivado da vegetação $C_4$ (cultura introduzida) em função do tempo, respectivamente. Os cálculos foram realizados considerando a camada 0-30 cm e utilizando o Programa '*Statistica'*, que nos permitiu elaborar um gráfico das funções para a modelagem das dinâmicas.

### *3.3.8. Análise estatística*

Todos os dados coletados e calculados foram analisados em delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema de parcelas subdivididas 3 x 3 x 4 (três sistemas de manejo do solo; três camadas de solo: 0-15; 15-30 e 30-60 cm; quatro repetições). Os dados foram submetidos ao teste de F para a análise de variância e o de Tukey para a comparação de médias, todos a 5%, utilizando-se o programa computacional SISVAR versão 5.3 (FERREIRA, 2010).

Somente as interações significativas pelo teste de F, entre os sistemas de manejo das áreas e as camadas de solo, para cada variável analisada (Ma, Mi, Pt, Ds e Ct), foram demonstrados e discutidos os resultados. Do mesmo modo, as médias gerais para cada variável, devido ao sistema de manejo das áreas e as camadas de solo, individualmente, também foram

submetidas ao teste de Tukey (P<0,05) e abordadas no trabalho, observando-se a significância pelo teste de F.

### 3.4. Teste de Meta-análise incluindo algumas situações no Cerrado Mineiro

Alterações no uso da terra e cobertura do solo podem ter um impacto drástico no ciclo global do carbono (POWLSON, 2005). Mudanças no uso do solo é a segunda maior fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE) causada pela atividade humana, principalmente devido ao desmatamento nos trópicos e subtrópicos. Com essa mudança no estoque de carbono orgânico do solo (MAIA et al., 2010; KASCHUK et al., 2011), os solos podem ser uma fonte ou sumidouro de $CO_2$ atmosférico, dependendo do sistema de cultivo e manejo adotado (OGLE et al., 2005; CORBEELS et al., 2006; DON et al., 2011).

O Cerrado brasileiro, que está entre as maiores fronteiras agrícolas do mundo, representa um exemplo notável de conversão do uso do solo. Até os anos 1970, essa região era utilizada principalmente para pastoreio extensivo. Desde então, pastagens no Cerrado têm sido gradualmente convertidas para as culturas anuais, inicialmente usando sistemas de preparo intensivo ou convencional (PC) e, mais recentemente, através de adoção de práticas de conservação, como o plantio direto (PD) e a integração lavoura-pecuária (ILP). A última envolve uma combinação de pastagens com cultivo baseado em plantio direto (VILELA et al., 2011).

Apesar de ser um tema amplamente pesquisado, especialmente durante a primeira década do século 21 (POWLSON et al., 2011), avaliar as alterações nos estoques de carbono orgânico do solo (COS) em escalas regionais e nacionais continua a ser uma tarefa difícil (WESEMAEL et

al, 2010; POWERS et al, 2011). O efeito da mudança do uso da terra no COS é mal quantificado devido à insuficiência de dados de qualidade e representatividade. De forma geral, os estudos não se focalizam apenas nos estoques de COS, ou ainda relatam somente informações para os horizontes superficiais. A obtenção de estimativas confiáveis de mudanças nos estoques de COS é fundamental para estimar os fluxos dos gases de efeito estufa, para identificar as políticas públicas e recomendar as melhores práticas de manejo, com base no seu impacto ambiental e sustentabilidade.

Várias tentativas têm sido feitas para melhorar as estimativas de alterações do COS devido aos sistemas de uso da terra. Em uma meta-análise global, Don et al. (2011) exploraram 385 estudos sobre a mudança no uso da terra nos trópicos para estimar as alterações no estoque COS para todos os principais tipos de mudanças no uso do solo. Guo e Gifford (2002) e Powers et al. (2011) conduziram uma meta-análise considerando o uso da terra e critérios climáticos. No entanto, ambos os estudos apresentaram resultados somente em termos relativos (isto é, porcentagem) sem comparação com outros métodos. A fim de melhorar o inventário de COS regional nos Estados Unidos, Mishra et al. (2012) utilizaram a regressão krigagem (*kriging*), e compararam os dados com um método de média simples para derivar estoques de referência, tal como aplicado no *Tier 2* da abordagem do IPCC (IPCC, 2006). Estes autores observaram que a regressão por krigagem diminuiu os erros globais de previsão de 45% em relação aos valores padrão de referência, e foi, assim, considerada uma técnica promissora para melhorar as estimativas de variação de existência de ações COS. Também se observa uma necessidade de desenvolver meta-análises com focos geográficos mais especificados.

Frente à rápida conversão da vegetação natural de Cerrado em diferentes classes de uso da terra, propôs-se, usando a técnica estatística de meta-análise, identificar a influência causada no estoque de carbono orgânico do solo a partir de diferentes conversões de uso no Cerrado mineiro. O presente estudo restringiu-se a análise de dados de uso e conversão do Cerrado apenas no estado de Minas Gerais.

### *3.4.1. Banco de Dados*

A presente meta-análise é baseada em uma extensa revisão de literatura relacionada com a influência do sistema de cultivo e manejo do solo nos estoques de carbono orgânico do solo (COS) no Cerrado mineiro. Foram utilizadas nesta meta-análise 17 referências científicas (Anexo 1) envolvendo 164 perfis de solo, recobertos por vegetação natural de Cerrado e outros diferentes usos como agricultura (plantio direto ou plantio convencional), pastagem (cultivada ou natural), reflorestamento, sistema misto (agricultura e pastagem / reflorestamento e pastagem). Dentre as referências utilizadas para realização da meta-análise, tem-se 1 tese de doutorado, 3 dissertações de mestrado, 1 relatório (Projeto RADAMBRASIL) e 12 artigos publicados em revistas científicas.

Dos 164 perfis analisados, trabalhou-se com 150, sendo os demais desprezados, alguns em virtude de mostrarem outras ocupações do solo, e outros, pelo fato das medidas não serem tomadas até a profundidade de 30 cm. Para cada ponto amostrado, valores de carbono foram tomados de profundidades 5, 10 ,15, 20, 25 e 30 cm. A média e desvio padrão de tais valores foram tomados, como representantes dos valores do ponto.

O banco de dados foi elaborado a partir das referências selecionadas (Anexo 1). Para isso, buscaram-se trabalhos científicos publicados em que a área de pesquisa estivesse situada no Cerrado mineiro. Assim, a cada referência encontrada, foram extraídas, inicialmente, informações sobre a área de pesquisa e os municípios envolvidos, bem como as coordenadas geográficas. Simultaneamente, coletaram-se os dados sobre o uso e/ou ocupação do solo, o número de perfis e de horizontes em que as amostras foram coletadas. Em seguida, foram extraídos dados de teor de carbono (%C) e de nitrogênio (%N), relação C/N, isótopos de C ($\delta^{13}C$) e de N ($\delta^{15}N$), estoque de carbono, densidade, pH, teores de areia, silte e argila (textura) e tipo de solo.

Mediante as informações extraídas, foi realizada uma classificação simplificada dos diferentes usos do solo encontrados, bem como dos tipos de solo, para facilitar as análises e discussões. Portanto, os usos do solo foram classificados em Cerrado, Agricultura (plantio direto ou convencional), Pastagem (natural ou cultivada), Reflorestamento e Sistema Misto (quando envolveu vários usos, como agricultura e pastagem, ou reflorestamento e pastagem, ou ainda reflorestamento e agricultura).

Os tipos de solo foram classificados conforme Bernoux et al. (2002, tab. 1, p.889). A classificação de solos simplificada, considerada pelos autores, baseia-se em critérios recomendados pelo IPCC / UNEP / OECD / IEA (1997, p. 5-38) como a textura do solo, saturação por bases e níveis de umidade, onde se propõem seis categorias de solo (Tabela 8) que são caracterizadas como,

> […] high activity clay (HAC) mineral soils, low activity clay (LAC) mineral soil, sandy soils, volcanic soils, wet soils, and organic soils (IPCC / UNEP / OECD / IEA, 1997).

**Tabela 8:** Categorias de solo e sua relação com as classes de solos originais do mapeamento de solo da EMBRAPA / FAO.

| Soil groups† | Relation with the original legend of the EMBRAPA soil map‡ | Area |
|---|---|---|
| | | km² |
| HAC soils | Podzólico (31 map units—231 812 km²), *Alfisols*: | 651 802 |
| | Vermelho-Amarelo eutrfico Ta (16—111 888 km²) | |
| | Vermelho-Amarelo TaTb associated with Ta Soil (7—73 992 km²) | |
| | Bruno (6—45 234 km²) | |
| | Plintico eutrófico Ta (2—699 km²) | |
| | Solo Litólico (100 map units—191 741 km²), *various lithic subgroups*: | |
| | Eutrofico (84—172 551 km²) | |
| | Humico (12—15 146 km²) | |
| | Rendzina (4—4 044 km²) | |
| | Solo Bruno não calcico (24 map units—101 895 km²), *Ustalf*; | |
| | Regossolo (29 map units—44 789 km²), *various lithic subgroups*; | |
| | Cambissolo eutroficos Ta (8 map units—41 127 km²), *Inceptisols*; | |
| | Brunizem (16—40 437 km²), *Chernozems*. | |
| LAC Latossolos | Latossolos (689 map units), *Oxisols*. | 3 305 725 |
| LAC non-Latossolos | Podzólico (555 map units—1 941 839 km²), *Ultisols*; | 2 752 408 |
| | Vermelo-amarelo distrofico Tb (306—1 205 935 km²) | |
| | Other Podzólios Tb (249—735 904 km²) | |
| | Solo Litolico distrofico (277—418 699 km²), *various lithic subgroups*; | |
| | Cambissolo (104 map units—192 154 km²), *Inceptisols*: | |
| | distrofico Tb (73—123 789 km²) | |
| | Other Cambissolo TbTa associated with Tb soils (31—68 365 km²) | |
| | Terra Estruturada (50 map units—126 296 km²), *Ultisols*; | |
| | Solo concrecionario Indiviso (22 map units—73 421 km²), *Ultisols*. | |
| Sandy soils | Areia Quartzosa (194 map units—544 743 km²), *Psamment*; | 686 995 |
| | Podzl (63 map units—142 253 km²) | |
| Wet soils | Laterita Hidromórfica (108 map units—440 547 km²), *Plinthaquox or Plintaquults*; | 811 717 |
| | Gley (182 map units—312 325 km²), *various aquic suborders*; | |
| | Solo Aluvial (78 map units—58 844 km²), *Entisols-Fluvents*. | |
| Other soils | Planossolo (59 map units—104 432 km²), *ustalf*; | 170 661 |
| | Solonetz (21 map units—29 892 km²), *Ustalf or Ustoll*; | |
| | Solo Salino and Solonchak (71 map units—23 915 km²), *Aridisols*; | |
| | Vertissolo (17 map units—12 422 km²), *Udert or Ustert*. | |

Fonte: Bernoux et al. (2002) adaptada pelo autor

† HAC = argila de alta atividade; LAC = argila de baixa atividade.
‡ Solos foram mapeados pela classificação brasileira (EMBRAPA, 1999). Os nomes da classificação brasileira são dados em fonte normal seguido do itálico que equivale a classificação americana (*U.S. Soil Taxonomy*) - Moraes et al. (1995).

A tabela 9 mostra a correlação entre as classes de solos apresentadas (EMBRAPA, 1999) e a nova classificação de solos da Embrapa (2013).

**Tabela 9:** Correlação entre as classes do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – EMBRAPA 1999 e 2013.

| **Sistema de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999)** | **Sistema de Classificação de Solos Atual (EMBRAPA, 2013)** |
|---|---|
| Podzólico | Argissolo |
| Solo Litólico | Neossolo Litólico |
| Bruno Não-Cálcico | Luvissolo |
| Latossolo | Latossolo |
| Terra estruturada | Nitossolos |
| Areia Quartzosa | Neossolo Quartzarenico |
| Podzol | Espodossolo |
| Solo Aluvial | Neossolo Flúvico |
| Laterita Hidromórfica | Plintossolo |
| Solonetz | Planossolo Nátrico |

Definições do sistema de classificação do solo brasileiro foram levados em consideração para separar HAC (solos com capacidade de troca catiônica ≥ 24 $cmol_c$/kg de argila) de LAC (solos com capacidade de troca catiônica < 24 $cmol_c$/kg de argila). O mapa original de solos brasileiros não possui qualquer tipo de solo que corresponda a solos vulcânicos e solos orgânicos. Com base nessas observações, os tipos de solo poderiam, teoricamente, ser divididos em solos HAC, solos LAC, solos arenosos (*sandysoils*) e solos úmidos (*wetsoils*). Mas, os solos brasileiros conhecidos como 'Latossolos', que pertence aos solos LAC, cobrem 38,8% do país (Figura 17). Os Latossolos brasileiros correspondem aos '*Oxisols'* na classificação americana (*U.S. Soil Taxonomy*) e em 'Ferralsols" na classificação da FAO-UNESCO. Assim, os solos LAC foram divididos em LAC-Latossolos '*LAC-Lat'* (118 perfis) em LAC-nãoLatossolos '*LAC-NonLat'* (12 perfis). As outras categorias de solo foram nomeados HAC *soils* (26 perfis), *sandysoils* (2 perfis) e *wetsoils* (3 perfis). Uma categoria adicional, contendo todos os solos que não correspondem a qualquer dos outros grupos, foi classificada como *'othersoils'* (3 perfis).

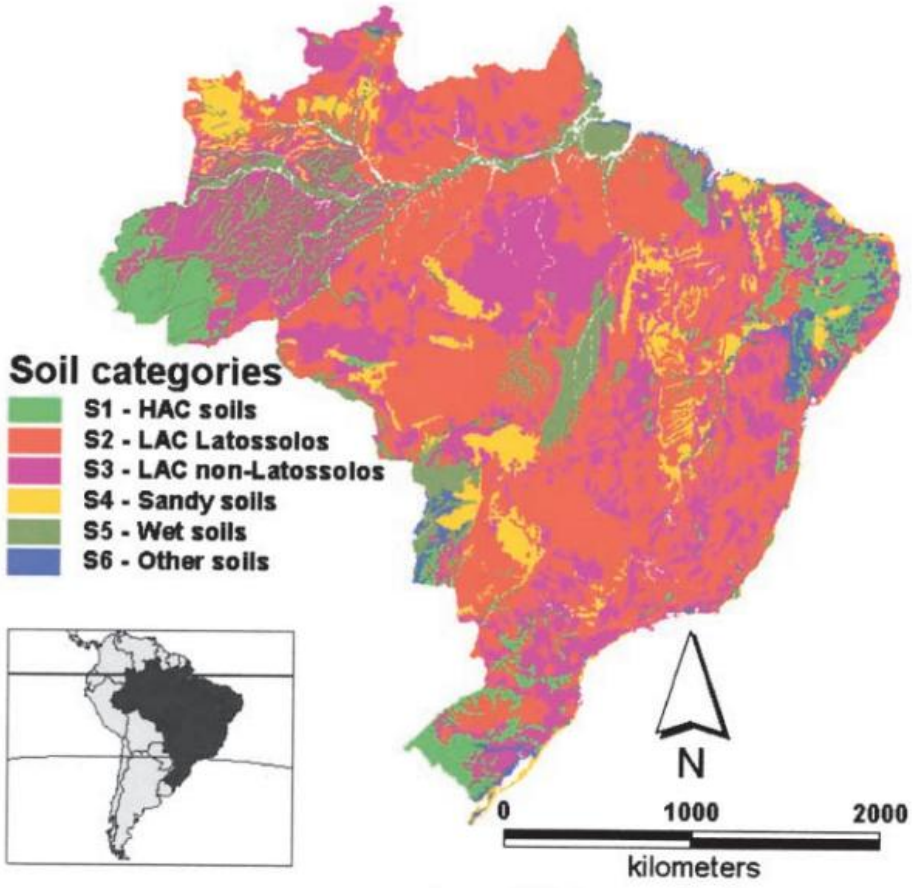



**Figura 17:** Mapa de Solo do Brasil.
(categorias de solo são detalhadas na Tabela 8)
Fonte: Bernoux et al. (2002)

O banco de dados elaborado envolve todas as informações e dados fornecidos pelos autores em cada referência analisada. Mas, por se tratar de autores e trabalhos com objetivos diferentes, não foram encontrados todos os dados desejados em todas as pesquisas. Dentre os 164 perfis analisados, apenas 49 apresentavam dados de densidade do solo (Ds), por exemplo. Tendo em vista que a Ds trata-se de uma variável essencial para o cálculo do estoque de carbono (Est.C), foi necessário calcular ou estimar a Ds para os demais perfis.

Nos perfis que apresentavam dados de estoque de carbono (equação 20), teor de carbono e espessura da camada foi possível calcular a densidade do solo – Ds(cal) através da equação 21:

$$Est\ C = CO\ x\ Ds\ x\ e \tag{20}$$

$$Ds(cal) = \frac{Est\ C}{CO\ x\ e} \tag{21}$$

Onde: *Est C* é o estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg/ha), *CO* é o teor de C orgânico total na camada de solo (g/kg), *Ds* é a densidade do solo na camada de solo (g/cm$^3$), *e* é a espessura da camada amostrada (cm), e *Ds(cal)* é a densidade do solo calculada na camada de solo (g/cm$^3$).

O cálculo de Ds(cal) foi utilizado apenas para 3 perfis que não apresentavam Ds para todas as profundidades analisadas. Para os outros 115 perfis, a Ds foi estimada mediante a utilização de uma equação geral (BERNOUX et al., 1998, p.4), bem como para específicos tipos de solo, como Areias Quartzosas (*Psamments*), Latossolos (*Oxisol*), Podzólicos (*Alfisols and Ultisols*) em superfície e em subsuperfície (BERNOUX et al., 1998, p.4-6).

A fim de refinar os valores estimados de Ds e aproximá-los do conjunto de dados coletados especificadamente na região do Cerrado mineiro, foi testada uma equação mais específica para estimar a Ds mediante o banco de dados construído. Para elaboração e análise da equação de Ds estimada específica foram utilizadas estatísticas descritivas e as análises de regressão linear múltiplas *(Multiple Linear Regression Data)*, sendo realizados pelo programa '*Statistica'* (STATSOFT, 1996). O desempenho das diferentes metodologias foi comparado

usando o método de mínimos quadrados. Várias análises de regressão linear foram realizadas em todo banco de dados e subgrupos, de acordo com a classificação do solo e horizonte. O procedimento utilizado foi o da regressão linear passo-a-passo, que permitiu variáveis independentes serem individualmente adicionadas ou excluídas do modelo em cada etapa da regressão, e, por conseguinte, a avaliação de mudanças no valor do coeficiente de explicação $R^2$. O método de regressão linear múltipla foi utilizado, pois é uma ferramenta prática que fornece resultados quantitativos diretos, e também porque o banco de dados não foi adaptado para análise espacial, como a geoestatística, devido à falta ou imprecisão das coordenadas geográficas.

Nas regressões lineares, apenas parâmetros com significância estatística de nível 0,01 foram considerados para calcular as equações de predição e a apresentação dos resultados. Os erros padrão (SE) das estimativas e as porcentagens de variâncias explicadas, por meio dos valores de $R^2$, foram usados como um meio para avaliar a confiabilidade dos modelos. As variáveis de entrada foram escolhidas porque são conhecidas por influenciar a densidade do solo (teor de carbono – %C e textura do solo – %*clay* e %*sand*) ou porque elas são facilmente obtidas (pH).

### *3.4.2. Meta-análise*

Meta-análise, método nomeado por Glass (1976) como "*the statistical analysis of a large collecction of analysis results from individual studies for the purpose of integrating the findings*", é uma técnica estatística que permite combinar e sintetizar resultados provenientes de estudos realizados de forma independente, produzindo, assim, estimativas que resumem o todo, chamadas de estimativas metanalíticas. Para que o resultado de uma meta-análise tenha

significado aplicado, os estudos que compõem os dados da meta-análise devem ser o resultado de uma revisão sistemática (RODRIGUES; ZIEGELMANN, 2010).

A meta-análise combina os resultados dos diferentes estudos com o objetivo de obter uma só estimativa global. Em cada estudo é estimado o tamanho do efeito (*effect-size*), unidade utilizada em meta-análise que reflete a relação de duas variáveis, por exemplo: diferença de médias, risco relativo ou razão das chances. A estimativa global ou verdadeira, do tamanho do efeito, resulta da média ponderada dos tamanhos do efeito de cada um dos estudos.

Neste trabalho, foi utilizado o método MTC (*Mixed treatment comparisons*), que se baseia num modelo bayesiano hierárquico, de efeitos fixo ou aleatórios, para comparar a variação de estoque de carbono (Est.C) frente às mudanças de uso da terra.

A presente meta-análise foi realizada considerando os estoques de carbono até a profundidade de 30 cm (horizonte aração e é a profundidade recomendada pelo IPCC, 2006), dos diferentes trabalhos desenvolvidos no Cerrado mineiro.

Calculou-se a média e o desvio padrão dos valores de Est.C para cada uso do solo separadamente – Cerrado, Agricultura, Sistema misto, Reflorestamento, Pastagem natural e Pastagem cultivada – construindo, para cada par de combinação do uso do solo, um intervalo de 95% de confiança para a diferença de médias de duas populações normais independentes. Deve-se ressaltar que dentro do mesmo uso do solo, a variação dos resultados de um trabalho para outro, muitas vezes, foi alta. Isso se deve, possivelmente, a existência de outras variáveis influenciando os resultados, como tipo e manejo do solo.

Foi verificada a normalidade dos dados, e àqueles identificados normais, ou aproximadamente normais, usou-se a distribuição *t-Student* para encontrar o valor tabelado, em função do grau de confiança fixado. O intervalo de confiança utilizado é para diferença de médias entre duas populações 1 e 2, as quais são consideradas independentes.

Assim, sejam duas populações 1 e 2, normais, independentes, com médias desconhecidas, o Intervalo de Confiança para a diferença de médias foi dado pela equação 22:

$$(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \pm t\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \qquad (22)$$

Onde:

t = é um valor da tabela *t-Student* encontrado em função do grau de confiança fixado e dos tamanhos amostrais;

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$ = médias das amostras das populações 1 e 2, respectivamente;

$s_1^2, s_2^2$ = correspondentes variâncias amostrais;

$n_1, n_2$ = tamanhos amostrais.

# CAPÍTULO IV

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

# CAPÍTULO IV

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1. Evolução do Uso do Solo na Área de Estudo

Desde 1975, áreas recobertas pela vegetação de Cerrado na Fazenda Cachoeira começam a ser substituídas por cultivos de arroz, soja e pastagem (HACKER, 2012, Comunicação Pessoal)[*]. Para espacializar as informações foi elaborado um mapa comparativo multitemporal (1979, 2000 e 2010) com a evolução do uso do solo nos 3 pontos de coleta das amostras de solo: [1] Cerrado – do tipo Cerradão (CN), [2] Sistema Misto = Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem 30 anos (P30) (Figura 18).

As informações do proprietário da fazenda referem-se às técnicas de manejo empregadas e ao tipo de gramínea cultivada desde a conversão da vegetação nativa até o momento, enquanto que o mapeamento multitemporal identifica o histórico da cobertura e uso e confirmam as informações prestadas por Hacker (Comunicação Pessoal, 2012)[*].

No período analisado, na área [1] o solo sempre foi recoberto pelo Cerrado Arbóreo Denso (Cerradão) (Tabela 10). Segundo o proprietário, essa área nunca foi desmatada nem queimada e corresponde à Reserva Legal da propriedade. Como hipótese de trabalho considerou-se que o Cerrado nativo representa as propriedades de referência.

[*] Entrevista concedida pelo Sr. Christian Reinhold Hacker, proprietário da Fazenda Cachoeira,

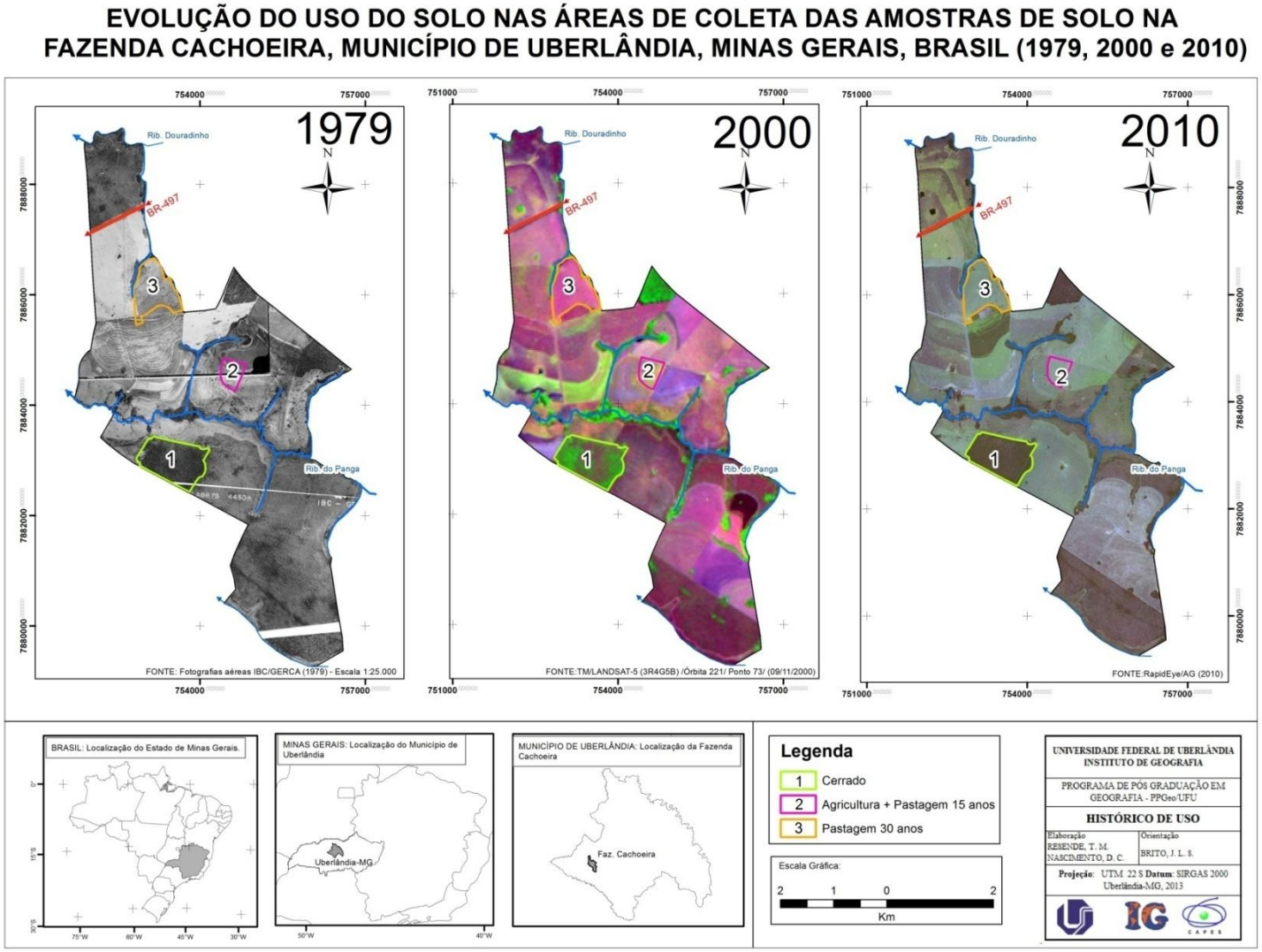



**Figura 18:** Evolução do uso do solo nas áreas de coleta das amostras de solo na Fazenda Cachoeira – município de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (1979, 2000 e 2010).

**Tabela 10:** Histórico do uso referente aos Pontos de Coleta de Solo – Fazenda Cachoeira, Município de Uberlândia (MG), 2013.

| **Área / Ponto de coleta** | **Coordenadas UTM** Datum: SIRGAS 2000 Zona: 22 S | **Uso do Solo** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **1979** | **2000** | **2010** |
| 1 | 753.040 E/ 7.884.194 N | Cerrado | Cerrado | Cerrado |
| 2 | 754.350 E/ 7.885.653 N | Cerrado – Campo Sujo | Pastagem | Pastagem |
| 3 | 752.826 E / 7.886.453 N | Pastagem | Pastagem | Pastagem |

Até a década de 1950, todas as áreas estudadas apresentavam vegetação natural de Cerrado preservada. O histórico da ocupação regional ajuda a interpretar as mudanças de vegetação. O processo precursor de ocupação do Brasil Central – área original coberta predominantemente pelo Cerrado – no século XVII, foi o interesse por ouro e pedras preciosas. Assim, pequenos povoados se formaram na região entre Cuiabá e oeste do Triângulo Mineiro, e ao norte, nos estados de Tocantins e Maranhão (IBAMA, 2003).

A partir da década de 1960, com a interiorização da capital do país e a abertura de rodovias, que amplos ecossistemas deram lugar à pecuária extensiva e a agricultura de soja, arroz e trigo, dando início a uma acelerada e indiscriminada ocupação da região do Cerrado, baseada em um modelo de exploração feita de forma fundamentalmente extrativista e, em muitos casos, predatória (IBAMA, 2003). Tais mudanças se apoiaram, sobretudo, na implantação de novas infraestruturas viárias e energéticas, bem como na descoberta de novas vocações dos solos, permitindo novas atividades agrárias rentáveis em detrimento de uma biodiversidade até então pouco alterada.

Depois de 1964, os processos tradicionais e as técnicas de exploração da terra do Cerrado passaram a ser vistos como causadores do atraso agrícola no país. Nesse período, iniciou-se a política agrícola do governo militar, criando mecanismos de incentivo à modernização no campo – incorporação das técnicas de correção da fertilidade dos solos, através da calagem e adubação química, controle de pragas por defensivos agrícolas e de mecanização dos solos. Como consequência desse processo, houve a expansão das áreas cultivadas no país atingindo as áreas de Cerrado (BRITO, 2001).

Durante as décadas de 1970 e 1980 houve um rápido deslocamento da fronteira agrícola, com base em desmatamentos, queimadas, uso de fertilizantes químicos e agrotóxicos. Um dos programas do governo federal que contribuiu efetivamente para expansão da fronteira agrícola foi o Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (Polocentro), criado pelo Decreto-Lei nº 75320 de 29/01/1975. Esse programa objetivava incentivar e apoiar a ocupação racional das áreas de Cerrado na região Centro-Oeste brasileira, nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Em Minas Gerais, o Polocentro abrangeu as regiões do Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba, Alto e Médio São Francisco e Vão do Paracatu, atingindo uma área de 146.174 km² (BRITO, 2001).

Como consequência dos programas de incentivo, ainda na década de 70, a expansão agrícola atinge a área desta pesquisa – Fazenda Cachoeira. Algumas áreas anteriormente recobertas por Cerrado foram substituídas por atividades agropecuárias. Em 1979, o ponto de coleta [3] já era cultivado com pastagem após a retirada do Cerrado (Tabela 10). De acordo com o proprietário da fazenda, essa pastagem é cultivada com a gramínea *Bachiaria ruzizienses*, formada em 1979, portanto há mais de 30 anos. Anteriormente à conversão, o Cerrado nativo era manejado com fogo, ou seja, durante as décadas de 1950 e 1960, a área sofria queimadas a

cada 2 anos. A partir de 1978/79, após o corte do Cerrado, foi feita a correção do solo com aplicação de aproximadamente 3 toneladas de calcário para neutralizar a acidez e adição de $Ca^{2+}$ e $Mg^{2+}$, a aração (com 30 cm de profundidade) e a aplicação de $NPK^{+}$ 'super simples' para o cultivo de pastagem. Vale ressaltar que, dependendo da quantidade de calcário aplicado para correção de solo, a medição de $\delta^{13}C$ pode ser inviabilizada pela formação de carbonatos.

Em meados da década de 80, a maior parte da paisagem da fazenda já estava alterada. O crescimento da área com pastagem nesse período pode ser explicado pela atividade e mentalidade dos pecuaristas da época, que consistia na formação de pastagens com diferentes espécies de capim *Brachiaria*, através do desmatamento do Cerrado, em rotação com um ou dois cultivos de arroz (BRITO, 2001).

O ponto de coleta [2] tipifica esse método comum de conversão das áreas de Cerrado em sistemas cultivados na região. Trata-se de uma área que, segundo o proprietário da fazenda, começou a ser desmatada, por volta de 1979/80. O corte do Cerrado foi feito gradativamente, ao longo de 10 anos. Durante essa década, observava-se na área o desenvolvimento do Campo Sujo. No início da década de 90, os arbustos restantes foram cortados e o solo foi deixado em 'pousio' durante 2 a 3 anos, e os arbustos removidos mecanicamente sem uso de fogo. Após esse período, foi feita a sistematização (nivelamento) do terreno a fim de proporcionar a distribuição uniforme da lâmina de água nos tabuleiros, a correção do solo (a calagem com aplicação de aproximadamente 4 toneladas de calcário dolomítico), a aração e o gradeamento (aproximadamente com 30 cm de profundidade, com incorporação de fosfato natural de Araxá e sulfato de amônia), sendo estabelecido nessa área o cultivo de arroz.

Após 2 anos de cultivo, o arroz foi substituído pela soja, que também permaneceu por 2 anos. A soja foi plantada com adubação $NPK^{+}$ inicial (não foi possível obter informações precisas das proporções do fertilizante, apenas que consistiu de pouco nitrogênio e mais fósforo e potássio) com inoculante (fixação de N no sistema solo/planta). No plantio da soja foi adotado o sistema de plantio direto, deixando a palhada da cultura anterior (arroz). Parte da palhada foi consumida pelo pastejo do gado, significando que nem todo o resíduo voltou ou foi incorporado no solo.

Após 2 anos de cultivo de soja, foi incorporada a pastagem nesta área, sendo cultivada a gramínea *Panicum maximum* por, aproximadamente, 4 a 5 anos. Porém, a baixa fertilidade do solo e, principalmente a toxidez por alumínio, fez com que a *Brachiaria* invadisse e dizimasse o *Panicum*. O sistema radicular da *Brachiaria* é mais profundo nestas condições de solo. Assim, nestes últimos 15 anos, a pastagem estabelecida nessa área foram as gramíneas *Panicum maximum* e *Bachiaria ruzizienses* por 5 e 10 anos, respectivamente (Tabela 10). O manejo estabelecido em solo sob pastagem foi apenas adubação de plantio e fosfatagem.

A figura 19 apresenta o histórico do uso das 3 áreas de coleta das amostras de solo – [1] Cerradão, [2] Sistema Misto = Agricultura + Pastagem 15 anos, e [3] Pastagem 30 anos.

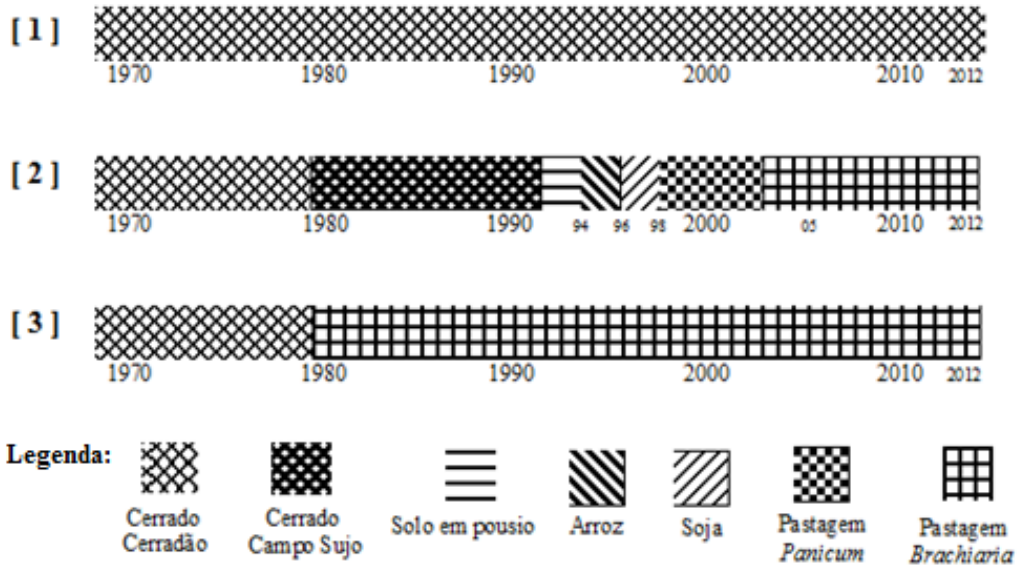



**Figura 19:** Histórico do uso das diferentes áreas de coleta das amostras de solo – [1] Cerrado, [2] Sistema Misto = Agricultura + Pastagem 15 anos, e [3] Pastagem 30 anos – Fazenda Cachoeira, Uberlândia, MG, Brasil.

## 4.2. Caracterização Física do Solo sob Vegetação Nativa de Cerrado e sob Sistemas Cultivados

O solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas, como densidade do solo, porosidade, estrutura e permeabilidade, adequadas ao desenvolvimento normal de plantas (ANDREOLA et al., 2000). À medida que essas áreas vão sendo incorporadas ao processo produtivo, os atributos físicos e químicos do solo sofrem alterações (SPERA et al., 2004), cuja intensidade varia com as condições de clima, natureza do solo, uso e manejos adotados.

Nos últimos anos, a preocupação com a qualidade do solo tem crescido, na medida em que seu uso pode redundar na diminuição de sua capacidade em manter uma produção econômica e biológica sustentável (CARVALHO et al., 2004). Segundo Doran e Parkin (1994), os atributos indicadores da qualidade do solo são definidos como propriedades mensuráveis que

influenciam a capacidade do solo na produção das culturas ou no desempenho de funções ambientais. A quantificação das alterações nos atributos do solo, decorrentes da intensificação de sistemas de uso e manejo, pode fornecer subsídios importantes para a definição de sistemas mais racionais de manejo, contribuindo assim para tornar o solo menos suscetível à perda de capacidade produtiva. Muitos atributos físicos do solo têm sido utilizados para quantificar as alterações provocadas pelos diferentes sistemas de manejo, ou até mesmo, como indicadores de qualidade do solo. Nesse contexto, buscou-se avaliar as alterações de alguns atributos físicos de um solo sob vegetação natural de Cerrado e sob sistema cultivados.

### *4.2.1. Textura*

A facilidade em estocar ou perder o carbono do solo pode estar associada à variação no teor e distribuição do tamanho das partículas finas (FELLER; BEARE, 1997; BAI et al., 2012). Na área de pesquisa, a quantidade de areia, silte e argila variou de acordo com o uso e profundidade (Tabela 11). Embora a textura seja considerada um atributo constante a médio e longo prazos, variações como as ocorridas podem acontecer em função da ação erosiva geológica e antrópica já que a classe textural facilita o processo, mesmo em relevo pouco movimentado.

No solo recoberto por Cerrado, na profundidade de 0-15 cm, o teor médio de areia grossa determinado foi de 30,5%, de areia fina 45,2%, de silte 3,9% e de argila 20,4%. Na profundidade de 15-30 cm o teor médio de areia grossa foi de 32%, de areia fina 43,3%, de silte 2,6% e de argila 22,1%. E na profundidade de 30-60 cm, o teor médio de areia grossa foi de 27,1%, de areia fina 43%, de silte 5,6% e de argila 24,3% (Tabela 11).

Em solos sob sistema misto (Agric+P15), na profundidade de 0-15 cm, o teor médio de areia grossa foi de 30,8%, de areia fina 51,8%, de silte 4,9% e de argila 12,5%. Entre 15-30 cm o teor médio de areia grossa foi de 29,9%, de areia fina 47,5%, de silte 3,2% e de argila 19,4%. E entre 30-60 cm o teor médio de areia grossa foi de 30,7%, de areia fina 48%, de silte 4% e de argila 17,3%. Já em solos sob pastagem há 30 anos, na profundidade de 0-15 cm, o teor médio de areia grossa foi de 29,5%, de areia fina 53,9%, de silte 5,4% e de argila 11,2%. Entre 15-30 cm o teor médio de areia grossa foi de 25,6%, de areia fina 53,1%, de silte 3,5% e de argila 17,8%. E entre 30-60 cm o teor médio de areia grossa foi de 25,5%, de areia fina 51,9%, de silte 2,4% e de argila 20,2% (Tabela 11).

**Tabela 11:** Análise Textural em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.

| **Identificação / Pontos** (Uso Atual) | **Profundidade** (cm) | **Textura** | | | | **Classificação Textural** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Areia Grossa** (%) | **Areia Fina** (%) | **Silte** (%) | **Argila** (%) | |
| **Solo sob Vegetação Nativa de Cerrado *(CN)*** | | | | | | |
| CN /P1-1 | 0-15 | 22,6 | 53,0 | 5,8 | 18,5 | Franco Arenoso |
| CN /P1-2 | 15-30 | 31,1 | 44,3 | 1,8 | 22,7 | Franco Argilo Arenoso |
| CN /P1-3 | 30-60 | 22,8 | 48,1 | 6,0 | 23,2 | Franco Argilo Arenoso |
| CN /P2-1 | 0-15 | 30,8 | 39,1 | 5,3 | 24,9 | Franco Argilo Arenoso |
| CN /P2-2 | 15-30 | 33,1 | 47,6 | 3,1 | 16,1 | Franco Arenoso |
| CN /P2-3 | 30-60 | 33,8 | 41,8 | 6,6 | 17,8 | Franco Arenoso |
| CN /P3-1 | 0-15 | 32,4 | 43,1 | 1,6 | 22,9 | Franco Argilo Arenoso |
| CN /P3-2 | 15-30 | 30,0 | 38,1 | 4,2 | 27,7 | Franco Argilo Arenoso |
| CN /P3-3 | 30-60 | 27,8 | 39,6 | 4,0 | 28,6 | Franco Argilo Arenoso |
| CN /P4-1 | 0-15 | 36,3 | 45,5 | 2,9 | 15,3 | Franco Arenoso |
| CN /P4-2 | 15-30 | 33,6 | 43,1 | 1,6 | 21,7 | Franco Argilo Arenoso |
| CN /P4-3 | 30-60 | 24,1 | 42,3 | 5,8 | 27,7 | Franco Argilo Arenoso |
| **Médias - CN** | **0-15** | **30,5** | **45,2** | **3,9** | **20,4** | **Franco Argilo Arenoso** |
| **Médias - CN** | **15-30** | **32,0** | **43,3** | **2,6** | **22,1** | **Franco Argilo Arenoso** |
| **Médias - CN** | **30-60** | **27,1** | **43,0** | **5,6** | **24,3** | **Franco Argilo Arenoso** |
| **Solo sob Sistema Misto (Agricultura + Pastagem 15 anos) *(Agric+P15)*** | | | | | | |
| Agric+P15 /P1-1 | 0-15 | 29,9 | 52,1 | 5,3 | 12,7 | Franco Arenoso |
| Agric+P15 /P1-2 | 15-30 | 27,5 | 51,7 | 1,7 | 19,1 | Franco Arenoso |
| Agric+P15 /P1-3 | 30-60 | 30,3 | 49,1 | 3,2 | 17,4 | Franco Arenoso |
| Agric+P15 /P2-1 | 0-15 | 34,0 | 48,2 | 5,9 | 11,9 | Areia Franca |
| Agric+P15 /P2-2 | 15-30 | 32,8 | 43,3 | 4,8 | 19,1 | Franco Arenoso |
| Agric+P15 /P2-3 | 30-60 | 31,8 | 47,3 | 3,5 | 17,4 | Franco Arenoso |
| Agric+P15 /P3-1 | 0-15 | 31,7 | 52,1 | 3,9 | 12,2 | Areia Franca |
| Agric+P15 /P3-2 | 15-30 | 26,4 | 49,7 | 5,7 | 18,2 | Franco Arenoso |
| Agric+P15 /P3-3 | 30-60 | 31,0 | 47,0 | 8,1 | 13,9 | Franco Arenoso |
| Agric+P15 /P4-1 | 0-15 | 27,5 | 54,7 | 4,8 | 13,1 | Franco Arenoso |
| Agric+P15 /P4-2 | 15-30 | 33,0 | 45,3 | 0,5 | 21,2 | Franco Argilo Arenoso |
| Agric+P15 /P4-3 | 30-60 | 29,8 | 48,4 | 1,4 | 20,4 | Franco Argilo Arenoso |
| **Médias – Agric+P15** | **0-15** | **30,8** | **51,8** | **4,9** | **12,5** | **Areia Franca** |
| **Médias – Agric+P15** | **15-30** | **29,9** | **47,5** | **3,2** | **19,4** | **Franco Arenoso** |
| **Médias – Agric+P15** | **30-60** | **30,7** | **48,0** | **4,0** | **17,3** | **Franco Arenoso** |
| **Solo sob Pastagem 30 anos *(P30)*** | | | | | | |
| P30 /P1-1 | 0-15 | 27,4 | 53,1 | 6,1 | 13,4 | Franco Arenoso |
| P30 /P1-2 | 15-30 | 24,3 | 53,6 | 1,1 | 21,0 | Franco Argilo Arenoso |
| P30 /P1-3 | 30-60 | 26,4 | 49,9 | 0,4 | 23,3 | Franco Argilo Arenoso |
| P30 /P2-1 | 0-15 | 29,1 | 53,0 | 8,8 | 9,2 | Areia Franca |
| P30 /P2-2 | 15-30 | 23,5 | 53,2 | 5,6 | 17,8 | Franco Arenoso |
| P30 /P2-3 | 30-60 | 21,0 | 54,3 | 3,0 | 21,7 | Franco Argilo Arenoso |
| P30 /P3-1 | 0-15 | 32,2 | 51,8 | 6,8 | 9,2 | Areia Franca |
| P30 /P3-2 | 15-30 | 26,1 | 54,3 | 1,2 | 18,4 | Franco Arenoso |
| P30 /P3-3 | 30-60 | 27,0 | 54,9 | 0,7 | 18,2 | Franco Arenoso |
| P30 /P4-1 | 0-15 | 29,4 | 57,6 | 0,2 | 13,1 | Areia Franca |
| P30 /P4-2 | 15-30 | 28,3 | 51,5 | 6,1 | 14,1 | Franco arenoso |
| P30 /P4-3 | 30-60 | 27,6 | 48,8 | 5,9 | 17,6 | Franco arenoso |
| **Médias – P30** | **0-15** | **29,5** | **53,9** | **5,4** | **11,2** | **Areia Franca** |
| **Médias – P30** | **15-30** | **25,6** | **53,1** | **3,5** | **17,8** | **Franco arenoso** |
| **Médias – P30** | **30-60** | **25,5** | **51,9** | **2,4** | **20,2** | **Franco arenoso** |

Os solos sob sistemas cultivados (Agric+P15 e P30) possuem constituição relativamente mais arenosa do que o solo sob Cerrado. Em CN, o teor médio de areia na profundidade de 0-15 cm foi de 75,7%. Em Agric+P15, o teor médio de areia nessa mesma profundidade foi de 82,6%; e em P30 de 83,4% (Tabela 11). A conversão do Cerrado para um uso antropizado, com mecanização para o preparo do solo em sua fase inicial, bem como a prática da calagem e adubação favoreceu a redução na estabilidade dos agregados com movimentação de argila (ADA) tanto verticalmente (Tabela 11) quanto horizontalmente por escoamento superficial. É comum na região do Triângulo Mineiro precipitações superiores a 50 mm/h, valor este muito superior a capacidade de infiltração pelo solo, mesmo para os Latossolos. A agregação do solo promove maior proteção física da matéria orgânica no solo, proporcionando aumento na estabilidade de agregados. A quebra dos agregados de solo expõe a matéria orgânica à atividade microbiana, reduzindo o conteúdo de carbono orgânico do solo (COSTA et al., 2004). Desse modo, o solo antropizado com sistemas cultivados resultou em diminuição dos teores de argila na superfície e consequentemente na capacidade potencial de acúmulo de carbono.

O uso da pastagem causou uma significativa redução nos teores de argila, que consequentemente, pode afetar a capacidade de acúmulo de carbono. Em solos sob sistemas cultivados (Agric+P15 e P30) o teor médio de argila foi de 11,9% na profundidade entre 0-15 cm, de 18,6% entre 15-30 cm e de 18,8% entre 30-60 cm. Verificou-se que para estas áreas os teores de argila foram mais baixos quando comparados com os solos sob vegetação nativa. Solos similares que anteriormente eram compostos por uma média de 22,3% de argila, são convertidos a uma quantidade média de 16,4% de argila.

A textura interfere em várias propriedades do solo, entre elas estão a densidade (DIAS JUNIOR; MIRANDA, 2000), a porosidade (TOGNON et al., 1998) e o estoque de carbono (SANTOS, 2010).

### *4.2.2. Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma) e Porosidade Total (Pt)*

A fim de determinar as propriedades físicas do solo que podem afetar o estoque de carbono, foram quantificados os volumes ocupados pela Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi) e Porosidade total (Pt). A porosidade é a fração volumétrica do solo ocupada por ar e água, sendo, portanto, o espaço em que ocorrem os processos dinâmicos gasosos e da solução de solo (HILLEL, 1970).

O arranjo e a geometria das partículas do solo determina a quantidade e a natureza dos poros existentes. Como as partículas variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, os poros diferem consideravelmente quanto à forma, comprimento, largura, tortuosidade e outras características. A porosidade depende principalmente da textura e da estrutura dos solos (KIEHL, 1979). Solos de textura arenosa, como os da área de estudo, pelo fato de possuírem partículas maiores, o espaço poroso também é constituído de poros maiores ou macroporos.

Na tabela 12 são apresentados os valores de macro, micro e porosidade total determinados na área de estudo.

**Tabela12:** Porosidade total (Pt), Macroporosidade (Ma) e Microporosidade (Mi) (cm³/cm³) das amostras de solo sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012**(1)**.

| **Áreas**(2) | **Pt ($cm^3/cm^3$)** | | | | **Ma ($cm^3/cm^3$)** | | | | **Mi ($cm^3/cm^3$)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Profundidades**(3) | | | | | | | | | | | |
| | **0-15** | **15-30** | **30-60** | **Médias - Áreas** | **0-15** | **15-30** | **30-60** | **Médias - Áreas** | **0-15** | **15-30** | **30-60** | **Médias - Áreas** |
| CN | 0,42 aA | 0,37 aB | 0,37 aB | **0,42 a** | 0,27 aA | 0,23 aA | 0,25 aA | **0,25 a** | 0,15 aA | 0,14 aA | 0,12 aA | **0,14a** |
| Agric+ P15 | 0,38 abA | 0,34 aA | 0,36 aA | **0,38 a** | 0,29 aA | 0,25 aA | 0,28 aA | **0,27 a** | 0,10 aA | 0,09 aA | 0,08 aA | **0,09b** |
| P30 | 0,37 bA | 0,35 aA | 0,37 aA | **0,37 a** | 0,27 aA | 0,26 aA | 0,26 aA | **0,26 a** | 0,10 aA | 0,09 aA | 0,11 aA | **0,10b** |
| **Médias - Profundidades** | **0,39 A** | **0,35 B** | **0,37 AB** | | **0,28 A** | **0,25 A** | **0,26 A** | | **0,12 A** | **0,11 A** | **0,10 A** | |
| **CV(%)** | | **7,5 (A)** | | **6,1(a)** | | **12,6 (A)** | | **13,4 (a)** | | **32,9 (A)** | | **19,8 (a)** |

(1) Médias seguidas da mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem entre si pelo teste de Tukey (probabilidade < 0,05); (2) Áreas, onde, CN = Cerrado natural; Agric+P15 = Uso agrícola e 15 anos de Pastagem; P30 = Pastagem há 30 anos; (3) Profundidades de coleta das amostras de solos para cada área de interesse.

Considerando os valores de porosidade total (Pt), nota-se há diferença estatisticamente significativa entre as três profundidades analisadas. Os valores médios de Pt encontrados na prof. 0-15 cm difere das demais profundidades, apesar de alguma semelhança entre essa área e a prof. 30-60 cm. No que diz respeito ao CN, há diferença estatisticamente significativa entre os valores aferidos na prof. 0-15 cm se comparados às demais profundidades analisadas. Para as áreas cultivadas (Agric+P15 e P30), os valores encontrados não diferem entre si até a profundidade de 60 cm.

O comportamento da Pt na profundidade de 0-15cm, permite afirmar que os valores encontrados no CN difere daqueles encontrados nas áreas cultivadas, apesar de alguma semelhança entre essa área e o sistema misto (Agric+P15). No entanto, não houve diferença estatística significativa nos valores encontrados para média das áreas. O maior valor médio de Pt foi encontrado na área de CN, sendo de 0,42 $cm^3/cm^3$ (Tabela 12). As áreas cultivadas apresentaram menores valores de porosidade total, 0,38 $cm^3/cm^3$ e 0,37 $cm^3/cm^3$ respectivamente para o sistema misto (Agric+P15) e P30, podendo ser atribuídos ao não revolvimento do solo no CN e ao decréscimo nos teores de argilas nos sistemas antropizados. É reconhecido que as práticas de manejo refletem na forma e frequência dos poros em razão do estresse imposto e da mudança da população de microorganismos e são passíveis de serem identificadas em profundidade, no espaço e no tempo, com redução no sequestro de carbono pelos solos (KAY; VANDENBYGAART, 2002).

Os solos arenosos possuem porosidade total na faixa de 0,32 a 0,47 $m^3/m^3$, enquanto que os solos argilosos variam de 0,52 a 0,61 $m^3/m^3$ e os solos francos apresentam um valor intermediário (REICHARDT; TIMM, 2004; LIBARDI, 2005). Portanto, os valores aferidos de Pt dos solos analisados são coerentes com suas classes texturais – de franco a arenosos.

De forma geral, em todos os usos foram encontrados valores de porosidade total considerados adequados para a qualidade dos solos, ou seja, valores próximos à 40%, visto que um solo ideal deve apresentar 50% de volume de poros totais que, na capacidade de campo, teria 33,5% ocupado pela água e 16,5% ocupado pelo ar (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Em relação à macroporosidade (Ma), observa-se que não houve diferença significativa entre os valores encontrados para as diferentes áreas analisadas – CN, Agric+P15 e P30, nem para as diferentes profundidades – 0-15 cm, 15-30 cm e 30-60 cm (Tabela 12). Os valores limites do volume total são muito amplos, porém, valores de macroporos inferiores a 0,10 $m^3/m^3$ podem ser restritivos às trocas gasosas e ao crescimento das raízes da maioria das culturas (TAYLOR; ASHCROFT, 1972). Valores superiores de macroporosidade em superfície, decorrentes do preparo do solo, têm sido relatados (CRUZ et al., 2003; TORMENA et al., 2004; BERTOL et al., 2004). Já em relação à microporosidade (Mi) houve um decréscimo no volume de microporos nas áreas cultivadas (0,09 e 0,10 $cm^3/cm^3$ em Agric+P15 e P30, respectivamente) em relação aos solos sob CN, 0,14 $cm^3/cm^3$ (Tabela 12), sugerindo migração vertical de argila uma vez que este parâmetro é fortemente influenciado pela textura e pelo teor de carbono orgânico e muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo (ARAÚJO et al., 2004, REINERT; REICHERT, 2006).

### *4.2.3. Densidade do Solo (Ds)*

A densidade do solo (Ds) é a relação entre massa de sólidos secos por seu volume, o que descreve de certa forma a estrutura do solo, que se refere ao arranjo e orientação das partículas sólidas, definindo também a geometria dos espaços porosos. A Ds varia com o volume total da amostra, assim, mantendo a mesma massa de solo e diminuindo o

seu volume, estará aumentando a sua densidade, indicando o grau de compactação de um solo (REICHARDT; TIMM, 2004). A densidade do solo é afetada por vários fatores, como sistema de manejo, tipo de cobertura vegetal, quantidade de resíduos à superfície e teor de matéria orgânica do solo (CAVENAGE et al., 1999; TORMENA et al.,2002; CRUZ et al., 2003; SPERA et al., 2004).

As áreas estudadas apresentaram variações estatisticamente significativas nos valores de Ds, indicando que houve efeito do manejo e/ou adubação sobre este atributo (Tabela 13). O uso principal da densidade do solo é como indicador da compactação, sendo medidos pelas alterações da estrutura e porosidade do solo. A densidade do solo tende a aumentar com o aumento da profundidade no perfil, isto se deve, provavelmente, ao menor teor de matéria orgânica, menor agregação, pouca quantidade de raízes e compactação causada pela massa das camadas superiores (REINERT; REICHERT, 2006).

**Tabela13:** Densidade (Ds, em g/cm$^3$) das amostras de solo sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012[(1)].

| **Áreas**[(2)] | **Ds (g/cm³)** Médias | |
|---|---|---|
| CN | **1,51** | **A** |
| Agric+ P15 | **1,59** | **AB** |
| P30 | **1,61** | **B** |
| **CV(%)** | **5,1** | |

[(1)] Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (probabilidade < 0,05); [(2)] Áreas, onde, CN = Cerrado natural; Agric+P15 = Uso agrícola e 15 anos de Pastagem; P30 = Pastagem há 30 anos.

Em P30, em função do longo tempo de pisoteamento do gado e do não revolvimento do solo, verificou-se um elevado valor de densidade (1,61 g/cm³), evidenciando que se trata de um solo mais compactado se comparado às demais áreas (1,51 g/cm³ e 1,59 g/cm³ em CN e

Agric+ P15, respectivamente) (Tabela13). O aumento dos valores de densidade em solos sob sistemas cultivados é também uma resposta do solo de textura mais arenosa e de mais difícil estruturação frente à retirada da vegetação nativa. Como evidência, o menor valor de Ds foi encontrado em solo sob vegetação nativa de Cerrado.

A densidade do solo é influenciada pela textura do solo (BUENO; VILAR, 1998; REICHARDT; TIMM, 2004; LIBARDI, 2005), solos arenosos apresentam densidade superior ao solo argiloso, enquanto que os solos siltosos apresentam comportamento intermediário. A densidade dos solos arenosos pode variar de 1,3 a 1,8 g/cm³, enquanto os solos argilosos esta variação pode ir de 0,9 a 1,6 g/cm³ e de 0,2 a 0,6 g/cm³ para solos orgânicos. Para a densidade máxima do solo, Klein et al. (2004) apresentam para um solo argiloso (0,66 g/g) a densidade de 1,55 g/cm³, enquanto um solo arenoso (0,32 g/g) foi de 1,77 g/cm³. Essa variação na densidade é em decorrência da microagregação das partículas de argila, que acarretam uma porosidade intra-agregados, o que reduz a densidade, sendo esses microagregados extremamente estáveis (KLEIN, 2005).

Outro fator que pode contribuir para esse comportamento da densidade do solo é o teor reduzido de matéria orgânica nos solos arenosos (BUCKMAN; BRADY, 1979; KLAR, 1988). Figueiredo et al. (1998) e Braida (2004) observaram que houve uma tendência de redução nos valores da densidade do solo com aumento do teor de matéria orgânica no solo. O material orgânico presente no solo, mas que ainda não entrou em processo acelerado de decomposição, tem o papel de prevenção contra a compactação, pois reduz a compressibilidade, propiciando aeração e diminuindo o efeito do rearranjamento das partículas do solo causado pelo tráfego de máquinas agrícolas (PECHE FILHO, 1999).

## 4.3. Teor do Carbono Orgânico (%C) em Solos sob Vegetação Nativa de Cerrado e em Solos sob Sistemas Cultivados

De acordo com Iwata et al. (2010), em solos tropicais, o carbono orgânico do solo (COS) contribui de forma determinante para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Neste sentido, o COS é fonte de energia para biomassa microbiana, atua no processo de armazenamento e fornecimento de nutrientes para o solo, disponibiliza água para os vegetais, contribui na formação e estabilização dos agregados, favorece a resistência do solo e melhorias significativas na densidade, além de favorecer a troca catiônica. A substituição da vegetação nativa por sistemas cultivados provocou alterações nos teores de carbono orgânico do solo (Tabela 14). Assim, a adoção de sistemas agrícolas que favoreça a conservação e o incremento do COS contribui positivamente para mitigar a degradação do solo bem como as emissões agrícolas de $CO_2$ para atmosfera, reduzindo as emissões antrópicas de gases de efeito estufa.

Sob vegetação original de Cerrado, na profundidade entre 0-15 cm foram determinados teores médios de carbono (%C) de 1,49%, na profundidade entre 15-30 cm teores de 0,69%, e na profundidade entre 30-60 cm teores de 0,59%. No solo recoberto com sistema misto (Agric+P15), entre 0-15 cm, os teores médios de carbono (%C) foi de 0,86%, na profundidade entre 15-30 cm teores de 0,59%, e na profundidade entre 30-60 cm teores de 0,52%. E no solo recoberto com pastagem há 30 anos, entre 0-15 cm, os teores médios de carbono (%C) foi de 1,2%, na profundidade entre 15-30 cm teores de 0,73%, e na profundidade entre 30-60 cm teores de 0,55% (Tabela 14).

**Tabela 14:** Teor do Carbono (%C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.

| **Identificação / Pontos** (Uso Atual) | **Profundidade** (cm) | **Teor do Carbono** (%C) |
|---|---|---|
| **Solo sob Vegetação Nativa de Cerrado *(CN)*** | | |
| CN /P1-1 | 0-15 | 1,50 |
| CN /P1-2 | 15-30 | 0,69 |
| CN /P1-3 | 30-60 | 0,58 |
| CN /P2-1 | 0-15 | 1,78 |
| CN /P2-2 | 15-30 | 0,74 |
| CN /P2-3 | 30-60 | 0,60 |
| CN /P3-1 | 0-15 | 1,61 |
| CN /P3-2 | 15-30 | 0,74 |
| CN /P3-3 | 30-60 | 0,56 |
| CN /P4-1 | 0-15 | 1,06 |
| CN /P4-2 | 15-30 | 0,61 |
| CN /P4-3 | 30-60 | 0,63 |
| **Médias - CN** | **0-15** | **1,49** |
| DP* | | 0,31 |
| **Médias - CN** | **15-30** | **0,70** |
| DP* | | 0,06 |
| **Médias - CN** | **30-60** | **0,59** |
| DP* | | 0,03 |
| **Solo sob Sistema Misto (Agricultura + Pastagem 15 anos) *(Agric+P15)*** | | |
| Agric+P15 /P1-1 | 0-15 | 0,81 |
| Agric+P15 /P1-2 | 15-30 | 0,54 |
| Agric+P15 /P1-3 | 30-60 | 0,50 |
| Agric+P15 /P2-1 | 0-15 | 0,73 |
| Agric+P15 /P2-2 | 15-30 | 0,60 |
| Agric+P15 /P2-3 | 30-60 | 0,45 |
| Agric+P15 /P3-1 | 0-15 | 1,09 |
| Agric+P15 /P3-2 | 15-30 | 0,61 |
| Agric+P15 /P3-3 | 30-60 | 0,58 |
| Agric+P15 /P4-1 | 0-15 | 0,82 |
| Agric+P15 /P4-2 | 15-30 | 0,62 |
| Agric+P15 /P4-3 | 30-60 | 0,56 |
| **Médias – Agric+P15** | **0-15** | **0,86** |
| DP* | | 0,16 |
| **Médias – Agric+P15** | **15-30** | **0,59** |
| DP* | | 0,04 |
| **Médias – Agric+P15** | **30-60** | **0,52** |
| DP* | | 0,06 |
| **Solo sob Pastagem 30 anos *(P30)*** | | |
| P30 /P1-1 | 0-15 | 1,28 |
| P30 /P1-2 | 15-30 | 0,58 |
| P30 /P1-3 | 30-60 | 0,53 |
| P30 /P2-1 | 0-15 | 1,33 |
| P30 /P2-2 | 15-30 | 0,76 |
| P30 /P2-3 | 30-60 | 0,50 |
| P30 /P3-1 | 0-15 | 1,22 |
| P30 /P3-2 | 15-30 | 0,82 |
| P30 /P3-3 | 30-60 | 0,64 |
| P30 /P4-1 | 0-15 | 0,99 |
| P30 /P4-2 | 15-30 | 0,76 |
| P30 /P4-3 | 30-60 | 0,53 |
| **Médias – P30** | **0-15** | **1,21** |
| DP* | | 0,15 |
| **Médias – P30** | **15-30** | **0,73** |
| DP* | | 0,11 |
| **Médias – P30** | **30-60** | **0,55** |
| DP* | | 0,06 |

* Desvio Padrão.

Valores mais elevados de %C em solo sob vegetação de Cerrado podem ser atribuídos ao não revolvimento do solo, permitindo a manutenção do estoque de carbono provenientes da queda de folhas e material vegetal. Em P30 verifica-se valores próximos àqueles aferidos para CN, tanto em superfície quanto em subsuperfície, o que também pode ser justificado pelo não revolvimento do solo ao longo desses 30 anos de implantação e cultivo da pastagem. O solo sob sistema misto (Agric+P15) apresentou os menores valores de %C em todas as profundidades, o que pode estar associado a dinâmica de uso e ao revolvimento existente neste solo, tendo em vista que no início da década de 90 foi feita a sistematização (nivelamento) do terreno, a correção, aração e gradagem do solo para o estabelecimento do cultivo de arroz e soja. Após 4 anos de cultivo que foi incorporada a pastagem. A diferente dinâmica de uso dos solos analisados justifica a variação nos valores de %C.

A textura do solo também reflete no resultado do %C. Os solos sob sistemas cultivados (Agric+P15 e P30) possuem constituição relativamente mais arenosa do que o solo sob Cerrado. Em CN, o teor médio de areia na profundidade de 0-15 cm foi de 75,7%, em Agric+P15 de 82,6%; e em P30 de 83,4%. Os solos arenosos e o não desenvolvimento da macroestrutura são fatores que contribuem para a diminuição da taxa de C. É conhecido que parte da MOS está protegida nos macroagregados, em uma taxa de 10% em solos cultivados e 19% em solos não cultivados segundo Beare et al. (1994). Esta capacidade se eleva com o aumento do teor de argila e ausência de cultivo assim como com a freqüência na qual os agregados são susceptíveis de serem destruídos *in situ* pelo cultivo ou ainda em relação à sua intrínseca estabilidade em água (BALESDENT; CHENU; BALABANE, 2000).

Quando os solos do Cerrado são convertidos em sistemas cultivados, caso não haja um manejo adequado, a degradação macroestrutural é rapidamente verificada, pois são originalmente frágeis e pouco desenvolvidos (BALBINO et al., 2002). A micro e a macroestrutura dos solos são reconhecidamente as unidades que controlam a dinâmica da MOS, pois nestas unidades desenvolve-se o processo de proteção física da MOS contra a biodegradação (OADES, 1995; SKENE et al., 1996; ANGERS; CHENU, 1997, FELLER; BEARE, 1997; BALESDENT; CHENU; BALABANE, 2000). Em vários ecossistemas e, especialmente nos agroecossistemas a formação e a destruição dos macroagregados que acompanham a variação da dinâmica sazonal ocorrem em um ritmo mais rápido do que a entrada de um novo C proveniente da cultura (PLANTE; FENG; MCGILL, 2002; SIX et al., 2004).

A figura 20 apresenta as curvas de distribuição dos teores de carbono nas áreas estudadas. Observa-se que nos primeiros 15 cm, os solos sob vegetação nativa de Cerrado apresentaram teores mais elevados de C, seguidos dos valores apresentados em solo sob P30. Aumentos no teor de matéria orgânica, notadamente na camada superficial do solo, têm sido associados a sistemas com o mínimo revolvimento do solo (REEVES, 1997 *apud* TORMENA et al., 2004). À medida que a profundidade aumenta, entre 30 e 60 cm, percebe-se uma aproximação nos valores dos teores de C tanto em solos sob vegetação nativa de Cerrado, como em solos sob sistemas cultivados (P30 e Agric+P15).

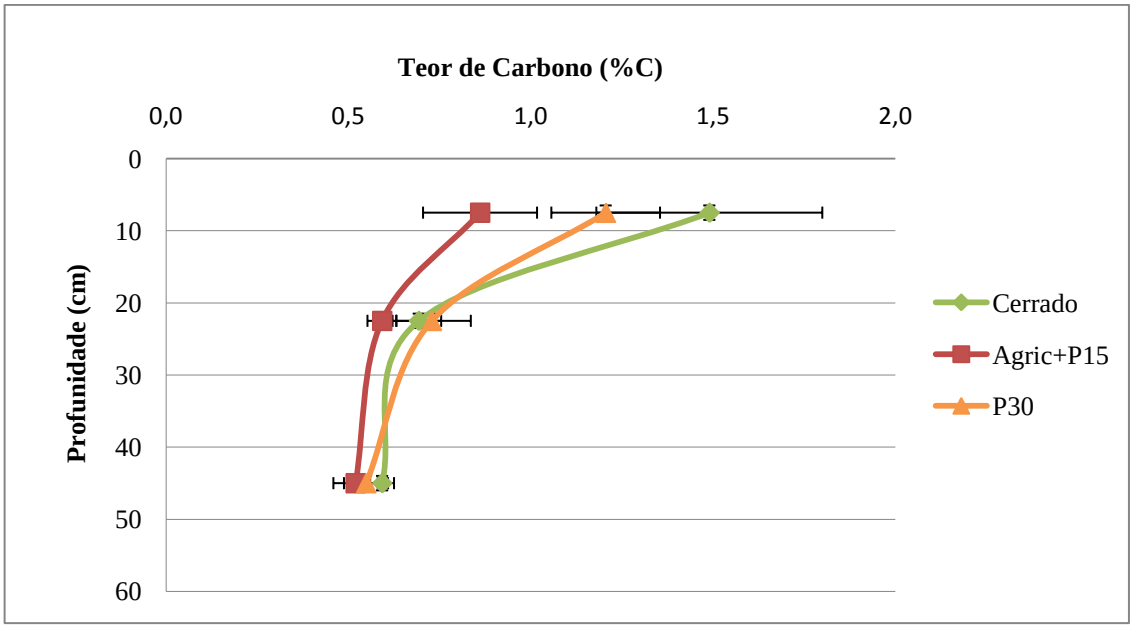



**Figura 20:** Teores de Carbono (%C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.

No solo sob Agric+P15 houve nitidamente um empobrecimento de C tanto em superfície quanto em subsuperfície se comparado à área sob vegetação nativa de Cerrado. No entanto, o solo recoberto com pastagem há 30 anos apresentou valores mais próximos daqueles encontrados na área sob vegetação nativa, evidenciando que são necessários longos anos após intervenção para que o sistema volte ao equilíbrio.

Estatisticamente, os valores de teor de carbono no solo (%C) indicam variação significativa para as diferentes profundidades – 0-15 cm, 15-30 cm e 30-60 cm, e áreas analisadas – CN, Agric+P15 e P30 (Tabela 15). Nos primeiros 15 cm, os solos apresentaram teores mais elevados de C, os quais vão diminuindo à medida que a profundidade aumenta, entre 15-30 cm e 30-60 cm, respectivamente.

**Tabela 15:** Dados estatísticos de Teor de Carbono (%C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012[(1)].

| **Áreas**[(2)] | **Profundidades**[(3)] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **00-15** | **15-30** | **30-60** | **Médias - Áreas** |
| CN | 1,49 aA | 0,70 aB | 0,59 aB | **0,93 a** |
| Agric+ P15 | 0,86 cA | 0,59 aB | 0,52 aB | **0,66 b** |
| P30 | 1,21 bA | 0,73 aB | 0,55 aB | **0,83 ab** |
| **Médias – Profundidades** | **1,19 A** | **0,67 B** | **0,56 B** | |
| **CV(%)** | **15,89 (A)** | | | **15,90 (a)** |

[(1)] Médias seguidas da mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem entre si pelo teste de Tukey (probabilidade < 0,05); [(2)] Áreas, onde, CN = Cerrado natural; Agric+P15 = Uso agrícola e 15 anos de Pastagem; P30 = Pastagem há 30 anos; [(3)] Profundidades de coleta das amostras de solos para cada área de interesse.

O valor médio de %C aferido nos perfis de solos sob vegetação nativa de Cerrado se assemelha estatisticamente ao valor médio verificado nos perfis de solo sob pastagem cultivada há 30 anos. Este comportamento evidencia a estabilidade do teor de carbono ao longo do tempo. Os valores encontrados nos perfis de solo sob Agric+P15 difere das demais áreas analisadas.

### 4.4. Estoque de Carbono (Est.C) em Solos sob Vegetação Nativa de Cerrado e em Solos sob Sistemas Cultivados

A conversão de ecossistemas naturais para uso agropecuário pode exercer uma grande influência no destino do carbono estocado nos solos. Sob vegetação original de Cerrado, na profundidade entre 0-15 cm foram determinados valores médios de estoque de carbono (Est.C) de 33,24 Mg/ha de C, na profundidade entre 15-30 cm teores de 15,58 Mg/ha de C, e na profundidade entre 30-60cm teores de 27,16 Mg/ha de C. No solo sob sistema misto (Agric+P15), entre 0-15 cm, os teores médios de estoque de carbono foi de 20,50 Mg/ha de C, na profundidade entre 15-30 cm teores de 14,52 Mg/ha de C, e na profundidade entre 30-60 cm teores de 24,08 Mg/ha de C. E no solo recoberto com pastagem 30 anos, entre 0-15 cm, os

teores médios de estoque de carbono foi de 28,87 Mg/ha de C, na profundidade entre 15-30 cm teores de 17,86 Mg/ha de C, e na profundidade entre 30-60 cm teores de 26,22 Mg/ha de C (Tabela 16).

Solo sob pastagem pode evidenciar, em determinada profundidade, estoque de carbono semelhante aos solos sob Cerrado, o que pode ser atribuído ao sistema radicular mais desenvolvido e bem distribuído das gramíneas sob pastagem, o que favorece a elevada deposição de C no solo na forma de raízes (RANGEL; SILVA, 2007). Segundo Teixeira e Bastos (1989) *apud* Rangel e Silva (2007), dados mostraram que as pastagens, em geral, apresentam distribuição regular do sistema radicular até um metro de profundidade, com 46% das raízes na camada superficial do solo (0-10 cm), 18,6% na camada de 10-20 cm, 22,8% na de 20-40 cm e 12,4% na de 40-100 cm.

**Tabela 16:** Estoque de Carbono (Est.C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.

| **Identificação / Pontos** (Uso atual) | **Profundidade** (cm) | **Teor de Carbono** (%C) | **Densidade do Solo (Ds)** (g/cm$^3$) | **Estoque de Carbono (Est.C)** (Mg/ha de C) |
|---|---|---|---|---|
| **Solo sob Vegetação Nativa de Cerrado *(CN)*** | | | | |
| CN /P1-1 | 0-15 | 1,50 | 1,47 | 33,09 |
| CN /P1-2 | 15-30 | 0,69 | 1,59 | 16,38 |
| CN /P1-3 | 30-60 | 0,58 | 1,59 | 27,77 |
| CN /P2-1 | 0-15 | 1,78 | 1,38 | 36,97 |
| CN /P2-2 | 15-30 | 0,74 | 1,40 | 15,51 |
| CN /P2-3 | 30-60 | 0,60 | 1,61 | 29,12 |
| CN /P3-1 | 0-15 | 1,61 | 1,54 | 37,23 |
| CN /P3-2 | 15-30 | 0,74 | 1,46 | 16,20 |
| CN /P3-3 | 30-60 | 0,56 | 1,32 | 22,08 |
| CN /P4-1 | 0-15 | 1,06 | 1,62 | 25,68 |
| CN /P4-2 | 15-30 | 0,61 | 1,56 | 14,24 |
| CN /P4-3 | 30-60 | 0,63 | 1,56 | 29,66 |
| **Médias - CN** | **0-15** | **1,49** | **1,50** | **33,24** |
| DP* | | 0,31 | 0,10 | 5,38 |
| **Médias - CN** | **15-30** | **0,70** | **1,50** | **15,58** |
| DP* | | 0,06 | 0,09 | 0,97 |
| **Médias - CN** | **30-60** | **0,59** | **1,52** | **27,16** |
| DP* | | 0,03 | 0,13 | 3,48 |
| **Solo sob Sistema Misto (Agricultura + Pastagem 15 anos) *(Agric+P15)*** | | | | |
| Agric+P15 /P1-1 | 0-15 | 0,81 | 1,50 | 18,17 |
| Agric+P15 /P1-2 | 15-30 | 0,54 | 1,59 | 12,74 |
| Agric+P15 /P1-3 | 30-60 | 0,50 | 1,54 | 22,84 |
| Agric+P15 /P2-1 | 0-15 | 0,73 | 1,69 | 18,46 |
| Agric+P15 /P2-2 | 15-30 | 0,60 | 1,62 | 14,49 |
| Agric+P15 /P2-3 | 30-60 | 0,45 | 1,46 | 19,50 |
| Agric+P15 /P3-1 | 0-15 | 1,09 | 1,59 | 25,91 |
| Agric+P15 /P3-2 | 15-30 | 0,61 | 1,61 | 14,86 |
| Agric+P15 /P3-3 | 30-60 | 0,58 | 1,61 | 27,96 |
| Agric+P15 /P4-1 | 0-15 | 0,82 | 1,58 | 19,45 |
| Agric+P15 /P4-2 | 15-30 | 0,62 | 1,71 | 15,97 |
| Agric+P15 /P4-3 | 30-60 | 0,56 | 1,54 | 26,00 |
| **Médias – Agric+P15** | **0-15** | **0,86** | **1,59** | **20,50** |
| DP* | | 0,16 | 0,08 | 3,65 |
| **Médias – Agric+P15** | **15-30** | **0,59** | **1,63** | **14,51** |
| DP* | | 0,04 | 0,05 | 1,34 |
| **Médias – Agric+P15** | **30-60** | **0,52** | **1,54** | **24,07** |
| DP* | | 0,06 | 0,06 | 3,71 |
| **Solo sob Pastagem 30 anos *(P30)*** | | | | |
| P30 /P1-1 | 0-15 | 1,28 | 1,49 | 28,60 |
| P30 /P1-2 | 15-30 | 0,58 | 1,62 | 14,01 |
| P30 /P1-3 | 30-60 | 0,53 | 1,60 | 25,48 |
| P30 /P2-1 | 0-15 | 1,33 | 1,63 | 32,49 |
| P30 /P2-2 | 15-30 | 0,76 | 1,70 | 19,40 |
| P30 /P2-3 | 30-60 | 0,50 | 1,66 | 24,87 |
| P30 /P3-1 | 0-15 | 1,22 | 1,64 | 29,96 |
| P30 /P3-2 | 15-30 | 0,82 | 1,64 | 20,35 |
| P30 /P3-3 | 30-60 | 0,64 | 1,54 | 29,54 |
| P30 /P4-1 | 0-15 | 0,99 | 1,64 | 24,42 |
| P30 /P4-2 | 15-30 | 0,76 | 1,56 | 17,68 |
| P30 /P4-3 | 30-60 | 0,53 | 1,57 | 24,97 |
| **Médias – P30** | **0-15** | **1,21** | **1,60** | **28,87** |
| DP* | | 0,15 | 0,07 | 3,37 |
| **Médias – P30** | **15-30** | **0,73** | **1,63** | **17,86** |
| DP* | | 0,11 | 0,06 | 2,80 |
| **Médias – P30** | **30-60** | **0,55** | **1,59** | **26,21** |
| DP* | | 0,06 | 0,05 | 2,23 |

* Desvio Padrão.

Considerando o estoque de carbono (Est.C), a figura 21 apresenta os valores médios calculados para a profundidade 0-60 cm. Observa-se a incorporação do carbono em solos sob pastagem há 30 anos, na profundidade de 0-15 cm, com valor médio de Est.C de 29 Mg/ha de C, que se aproxima daquele verificado em solos sob vegetação natural, que é de 33 Mg/ha de C. Na profundidade de 15-30 cm, o valor médio de Est.C em solos sob P30 se equivalem ou ultrapassam os valores determinados para solos sob vegetação natural de Cerrado.

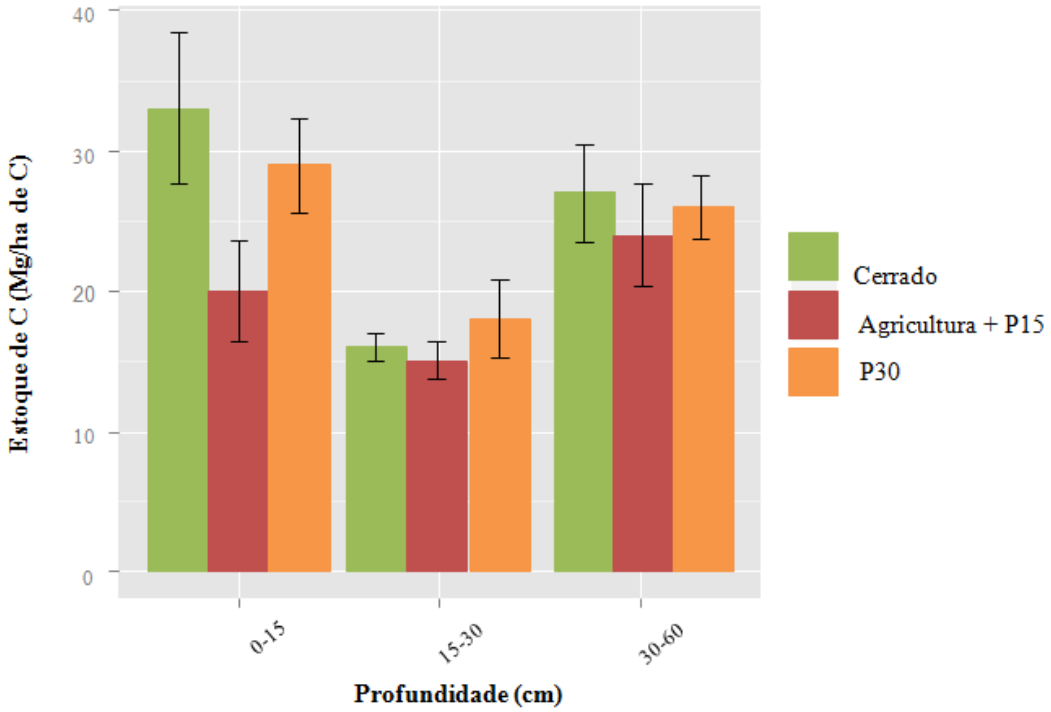



**Figura 21:** Estoque de Carbono (Est.C) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.

Observa-se ainda a incorporação de C em solos sob Agric+P15 em profundidades maiores, sendo que todas as áreas estudadas, mesmo após anos de cultivo, atingem, aparentemente, na camada de 30-60 cm, um estado de equilíbrio, ou o estado não foi afetado em função do tempo curto de análise. Para as outras camadas pode ser observado que ainda existem diferenças nos estoques entre as áreas de Agric+P15 e P30, sendo essa diferença maior na

camada de 0-15 cm. Nesta camada, o estoque é de, aproximadamente, 33 Mg/ha de C no solo sob vegetação natural de Cerrado, e de 20 e 29 Mg/ha de C, respectivamente, em solos sob sistema misto (Agric+P15) e P30. Estes valores representam um decréscimo de 39 e 12% em relação ao solo sob vegetação nativa.

Vários autores têm observado que a substituição da vegetação nativa por sistemas cultivados provoca diminuição nos estoques de carbono do solo. Em áreas tropicais, Cerri et al. (1991) estudando uma cronossequência de introdução de cana-de-açúcar em solo do tipo Latossolo Vermelho-Escuro no estado de São Paulo, observaram uma redução de 56% no estoque de carbono após 50 anos de cultivo. Sanchez et al. (1983) em trabalho conduzido sob um *Ultisol* na Amazônia colombiana, observaram uma diminuição de 27% do carbono no solo, após 8 anos de cultivo contínuo da sequencia arroz-milho-soja. Martins et al. (1990) observaram, no estado do Pará em solo do tipo Latossolo Podzolizado, um decréscimo de 40% nos teores de carbono do solo após cinco anos de cultivo com culturas anuais e, em áreas sob pousio por três anos, com desenvolvimento de vegetação secundária, os teores de carbono representavam 80% daqueles encontrados no solo sob vegetação nativa.

Pelo exposto, parece que o uso do solo após o desmatamento determina, em grande parte, o comportamento dos estoques de C. Outro fator que determinar o nível de perda e/ou ganho dos estoques de C é a textura bastante arenosa do solo estudado. Mann (1986), a partir de uma análise de 625 pares de solos de regiões temperadas e tropicais, observou uma perda máxima de carbono de 36%, quando consideradas todas as amostras. Quando consideradas somente amostras de solos arenosos (*Inceptisols* e *Psamments*), com teores iniciais de carbono, as perdas foram de 13%. Segundo o autor, essa diferença de comportamento foi determinada pelas diferentes quantidades de carbono inicialmente presentes nos solos. Assim, aumentos

dos estoques ou menores taxas de perda de carbono observadas nos solos inicialmente pobres em carbono indicam que está havendo, relativamente, maior entrada do que perda, em relação aos solos com maiores quantidades iniciais de carbono. Wheeting (1937) observou nas séries mais arenosas dos 73 pares de amostras de solo analisadas, ganhos entre 41 e 53% nos conteúdos iniciais de carbono, contra 28% nas demais amostras. Moraes (1991), estudando duas cronossequencias sob pastagem cultivada na Amazônia brasileira, observou para a camada de 0-30 cm uma redução inicial no conteúdo de carbono nas duas cronossequencias. Após 20 anos de cultivo a área sob solo do tipo Podzólico Vermelho-Escuro apresentou uma perda de 25% em relação ao conteúdo inicial, e aquela sob solo do tipo Podzólico Vermelho-Amarelo, mais arenoso, um ganho de 14%.

O uso agrícola de solos inicialmente pobres em carbono pode resultar em condições menos favoráveis para a mineralização quando comparados a solos com grandes quantidades iniciais de carbono, condições estas devidas aos mesmos não possuírem substrato adequado tanto qualitativa como quantitativamente para a manutenção da população de decompositores (JENNY, 1980; MANN, 1986). A implantação de um sistema de cultivo que recobre totalmente o solo, como é o caso da pastagem, leva o sistema a uma recuperação dos estoques de carbono, em um período de tempo que é variável em função das propriedades de cada tipo de solo (MORAES, 1991).

Acredita-se que a introdução de pastagens cultivadas na situação estudada parece ter provocado, inicialmente, uma redução nos teores de carbono do solo, uma vez que os teores de carbono observados no solo sob sistema misto (Agric+P15), na profundidade de 0-15 cm, apresentaram valores inferiores do que aqueles sob vegetação nativa. No entanto, em solos sob pastagem há 30 anos, nos primeiros 15 cm, por ser a zona de maior concentração de

biomassa radicular da gramínea, essa redução não foi evidenciada, devido à incorporação de carbono por parte da gramínea, apresentando valores próximos daqueles verificados sob vegetação nativa. Em profundidades maiores (30-60 cm) há indícios de que o sistema já se estabilizou, ou o estado não foi afetado em função do tempo curto de análise, mantendo níveis de carbono bem próximos em todas as áreas analisadas – Cerrado, Sistema misto e Pastagem 30 anos.

A similaridade entre o CN e P30 na área de estudo indica a potencial eficiência da biomassa radicular das gramíneas de incorporar carbono até as maiores profundidades do solo após longo tempo de cultivo. Embora haja divergência quanto à relação direta entre conversão do solo do cerrado e o aumento do estoque de C em pastagens cultivadas é reconhecido que a distribuição do C no perfil é influenciada diretamente pela profundidade do enraizamento da vegetação e pelo manejo agrícola (NEILL et al., 1997, LAL, 1997, DON et al., 2011). Ao contrário das pastagens degradadas do Cerrado responsáveis pela depleção da MOS (Maia et al., 2009 reportaram perda ou emissão de 0,28 Mg/ha/ano de C), as pastagens cultivadas no Cerrado possuem profundo enraizamento e elevada densidade de cobertura das gramíneas reduzindo a temperatura do solo e a decomposição da matéria orgânica, condições que refletem na produção e acumulação de grande quantidade de C abaixo da superfície do solo (FISHER; THOMAS, 2004, BATLLE-BAYER et al., 2010). De acordo com Fisher et al. (1994), a substituição das savanas da América do Sul por pastagens cultivadas aumentam o estoque de C no primeiro metro do solo e apresenta potencial de sequestro entre 100 a 507 Mt/ano de C.

Contudo, o ganho de COS é finito em magnitude e duração, ou seja, ele é induzido pela prática de manejo que interrompe o estado de equilíbrio original do sistema natural (JANZEN

et al., 1997). Desta forma, a situação encontrada em Agric+P15 parece ser uma fase intermediária na qual as perdas ainda superam os ganhos com o manejo da pastagem, enquanto que em P30 uma resposta da prática de manejo parece se configurar como uma situação de um novo equilíbrio (ver taxa de substituição de vegetação $C_4$ em relação à $C_3$ na tabela 18, item 4.5.1). Nossos resultados mostram que na cronossequência não houve aumento do estoque de C quando o cerrado foi substituído pela pastagem cultivada, apesar do estoque de C ter sido maior em P30 do que em Agric+P15. Assim como ressaltaram Scurlock e Hall (1998) e Batlle-Bayer et al. (2010), tomando o Cerrado nativo como "*baseline*" e não as pastagens degradadas, a substituição das savanas por pastagens cultivadas apenas otimizam o estoque mas não atinge a eficiência de sequestrar o carbono.

## 4.5. Evolução da Matéria Orgânica do Solo sob Sistema Cultivado

### *4.5.1. Natureza e Evolução do Carbono Orgânico do Solo ($\delta^{13}C$)*

O enriquecimento ou empobrecimento no solo, em relação à origem do carbono, está acompanhado de mudanças nos valores isotópicos ($\delta^{13}C$). Amparados no fato de que a história vegetativa da área de estudo é bem conhecida, as mudanças no valor $\delta^{13}C$ da matéria orgânica originada de diferentes tipos de vegetação ($C_3$ e $C_4$) foram usadas para descrever a perda do C da vegetação nativa e a acumulação de C derivado da nova vegetação assim como proposto por Cerri et al. (1985). A vegetação do Cerrado brasileiro é composta predominantemente por espécies arbóreas $C_3$ e gramíneas $C_4$.

Em ecossistemas naturais, o carbono orgânico do solo é derivado quase exclusivamente dos resíduos das plantas desenvolvidas naquele local, enquanto que em sistemas agropecuários ele

tem, pelo menos, duas origens: [1] dos restos da vegetação nativa anterior, e [2] dos restos da colheita e da decomposição de resíduos advindos da cultura estabelecida. Para a quantificação dessas duas fontes de carbono tem sido utilizada a variação da relação isotópica $^{12}C/^{13}C$ ($\delta^{13}C$). Esse método baseia-se na existência de mudanças na composição isotópica do carbono do solo quando a vegetação nativa constituída predominantemente por plantas $C_3$ é substituída por plantas de metabolismo $C_4$, como é o caso da introdução de braquiárias.

Onde a vegetação foi alterada de plantas com ciclo fotossintético $C_3$ para $C_4$, ou vice-versa, mudanças na abundância natural do $^{13}C$ na matéria orgânica do solo (MOS) pode ser usada, ao longo do tempo, para identificar fontes de carbono orgânico no solo e determinar a taxa de rotatividade (‘*turnover’)* da MOS, fornecendo informações a respeito do papel funcional de ecossistemas tropicais no ciclo global do carbono. Sabe-se que imensas áreas de vegetação nativa de Cerrado $C_3$ foram e continuam sendo substituídas por pastagens e terras cultiváveis $C_4$. Esta pesquisa se utiliza do isótopo estável $^{13}C$ para estimar o ‘*turnover’* da MOS, usando a cronossequencia de vegetação nativa de Cerrado e de sistema misto e pastagem com diferentes idades no Cerrado mineiro.

Na área de estudo, a MOS da área recoberta por Cerrado apresentou $\delta^{13}C$ médio de -26,0‰ na profundidade entre 0-15cm, -21,0‰ entre 15-30 cm e -17,4‰ entre 30-60 cm (Tabela 17). Os valores obtidos são similares aos valores isotópicos de -27,76‰ determinados para as espécies arbóreas típicas do Cerrado (HOFFMANN et al., 2005). Na possibilidade de coexistência com espécies arbóreas da floresta úmida, os valores isotópicos são pouco menos enriquecidos (-28,44‰). Carvalho et al. (2010) observou que abundância isotópica da MOS sob Cerradão se assemelha à determinada sob a floresta Amazônica, e que os valores são diferentes daqueles observados para solos sob Cerrado *stricto senso*.

**Tabela 17**: Natureza do Carbono ($\delta^{13}C$) em solos sob [1] Cerrado (CN), [2] Agricultura + Pastagem 15 anos (Agric+P15), e [3] Pastagem com 30 anos de implantação (P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.

| **Identificação/ Pontos** (Uso atual) | **Profundidade**(cm) | **$\delta^{13}C$**(‰) |
|---|---|---|
| **Solo sob Vegetação Nativa de Cerrado *(CN)*** | | |
| CN /P1-1 | 0-15 | -26,30 |
| CN/P1-2 | 15-30 | -19,85 |
| CN/P1-3 | 30-60 | -16,42 |
| CN/P2-1 | 0-15 | -26,68 |
| CN/P2-2 | 15-30 | -24,32 |
| CN/P2-3 | 30-60 | -20,39 |
| CN/P3-1 | 0-15 | -25,37 |
| CN/P3-2 | 15-30 | -18,76 |
| CN/P3-3 | 30-60 | -15,66 |
| CN/P4-1 | 0-15 | -25,64 |
| CN/P4-2 | 15-30 | -20,89 |
| CN/P4-3 | 30-60 | -17,08 |
| **Média - CN** | **0-15** | **-26,00** |
| DP* | | 0,60 |
| **Média - CN** | **15-30** | **-20,96** |
| DP* | | 2,40 |
| **Média - CN** | **30-60** | **-17,39** |
| DP* | | 2,09 |
| **Solo sob Sistema Misto (Agricultura + Pastagem 15 anos) *(Agric+P15)*** | | |
| Agric+P15 /P1-1 | 0-15 | -14,82 |
| Agric+P15 /P1-2 | 15-30 | -16,05 |
| Agric+P15 /P1-3 | 30-60 | -16,36 |
| Agric+P15 /P2-1 | 0-15 | -15,39 |
| Agric+P15 /P2-2 | 15-30 | -16,73 |
| Agric+P15 /P2-3 | 30-60 | -14,96 |
| Agric+P15 /P3-1 | 0-15 | -15,36 |
| Agric+P15 /P3-2 | 15-30 | -16,67 |
| Agric+P15 /P3-3 | 30-60 | -16,06 |
| Agric+P15 /P4-1 | 0-15 | -15,68 |
| Agric+P15 /P4-2 | 15-30 | -17,17 |
| Agric+P15 /P4-3 | 30-60 | -17,17 |
| **Média – Agric+P15** | **0-15** | **-15,31** |
| DP* | | 0,36 |
| **Média – Agric+P15** | **15-30** | **-16,66** |
| DP* | | 0,46 |
| **Média – Agric+P15** | **30-60** | **-16,14** |
| DP* | | 0,92 |
| **Solo sob Pastagem 30 anos *(P30)*** | | |
| P30 /P1-1 | 0-15 | -14,23 |
| P30 /P1-2 | 15-30 | -15,25 |
| P30 /P1-3 | 30-60 | -14,64 |
| P30 /P2-1 | 0-15 | -14,49 |
| P30 /P2-2 | 15-30 | -15,69 |
| P30 /P2-3 | 30-60 | -14,68 |
| P30 /P3-1 | 0-15 | -13,64 |
| P30 /P3-2 | 15-30 | -14,75 |
| P30 /P3-3 | 30-60 | -14,63 |
| P30 /P4-1 | 0-15 | -13,94 |
| P30 /P4-2 | 15-30 | -14,78 |
| P30 /P4-3 | 30-60 | -14,57 |
| **Média - P30** | **0-15** | **-14,08** |
| DP* | | 0,36 |
| **Média - P30** | **15-30** | **-15,12** |
| DP* | | 0,45 |
| **Média - P30** | **30-60** | **-14,63** |
| DP* | | 0,05 |

O $\delta^{13}C$ da matéria orgânica dos solos sob sistemas cultivados (Agric+P15 e P30) se difere daqueles determinados em solos sob Cerradão e indicam clara tendência de alteração da decomposição e incorporação de MOS nas áreas convertidas. Houve nítida incorporação do C derivado de gramíneas $C_4$ cultivadas, ou seja, do C proveniente da cultura introduzida, com o $\delta^{13}C$ tendendo ao longo do tempo a valores maiores, próximos ao índice de -13,2‰, valor isotópico foliar médio observado para as gramíneas do Cerrado (SANAIOTTI et al., 2002). Em P30, o valor de -14,1‰ na profundidade entre 0-15 cm, -15,1‰ entre 15-30 cm e -14,6‰ entre 30-60 cm (Tabela 17), reflete a incorporação da matéria orgânica derivada da braquiária.

Os solos sob sistema misto (Agric+P15) apresentou $\delta^{13}C$ médio de -15,31‰ na profundidade entre 0-15cm, -16,65‰ entre 15-30 cm e -16,14‰ entre 30-60 cm (Tabela 17). Valor isotópico similar foi determinado no solo sob pastagem 30 anos, $\delta^{13}C$ médio de -14,07‰ na profundidade entre 0-15cm, -15,12‰ entre 15-30 cm e -14,63‰ entre 30-60 cm (Tabela 17). Em solos sob sistema misto, o cultivo de soja e arroz, ambos de ciclo fotossintético $C_3$, por um período de 4 anos antes do plantio da forrageira, pode ter provocado uma pequena diminuição nos valores de $\delta^{13}C$ (variando de -15,31 a -16,65‰ entre 0-60 cm), quando comparados ao solo sob P30.

As taxas de substituição do carbono em Agric+P15 e P30 foram calculadas relacionando os estoques obtidos com o valor isotópico da MOS. Em sistemas cultivados, os processos de contínua mineralização do carbono derivado da vegetação nativa ($CdVC_3$) e a progressiva incorporação do carbono derivado dos restos da cultura introduzida ($CdVC_4$) ocorrem simultaneamente (FERNANDES et al., 2007). Usando a variação da relação isotópica $^{12}C/^{13}C$ ($\delta^{13}C$) chegou-se aos resultados que indicam um padrão geral de aumento do carbono derivado de vegetação $C_4$, ou seja, do C proveniente da cultura introduzida. O $\delta^{13}C$ tende a

alcançar valores maiores ao longo do tempo, próximo ao índice de -12,5‰ característicos de gramíneas.

Ocorreu um declínio rápido do carbono derivado de vegetação $C_3$, sendo que restaram apenas 7,7 % e 0,4% do conteúdo de carbono original, na profundidade entre 0-15 cm, em solos sob sistema misto (Agric+ P15) e P30, respectivamente, tendo em vista que o estoque de carbono médio, originalmente de 33,24 Mg/ha de C em solos sob vegetação nativa, atingiu 20,50 Mg/ha de C em solos sob sistema misto (Agric+P15) e 28,87 Mg/ha de C em solos sob 30 anos de introdução de pastagem (Tabela 18). Na profundidade de 15-30 cm, 35,2% e 12,2%, são remanescentes da vegetação nativa, respectivamente em solos sob Agric+ P15 e P30. O estoque de carbono médio em solos sob vegetação nativa era de 15,58 Mg/ha de C passando a 14,52 Mg/ha de C e 17,86 Mg/ha de C respectivamente em solos sob sistema misto (Agric+P15) e pastagem há 30 anos. E na profundidade de 30-60 cm, o estoque de carbono médio, originalmente de 27,16 Mg/ha de C sob vegetação nativa, atingiu 24,08 Mg/ha de C em solos sob sistema misto (Agric+P15) e 26,22 Mg/ha de C em solos com 30 anos de introdução de pastagem. Desses totais, 59,5% e 10,7% são remanescentes da vegetação nativa, respectivamente para as áreas sob sistema misto (Agric+P15) e pastagem há 30 anos (Tabela 18).

A área estudada mostrou um padrão geral de aumento do C derivado da vegetação $C_4$ (cultura introduzida) e um declínio rápido do C derivado da vegetação $C_3$ (vegetação nativa), sendo que a média de substituição da MOS derivada de plantas $C_4$, considerando a camada de 0-15 cm, foi de 91,3% em Agric+P15 e de 99,6% em P30. Outros autores, como Chone et al. (1991), observaram em uma cronossequencia sob Latossolo amarelo perto de Manaus (AM),

que, após 8 anos de pastagem, restavam no solo 56% do carbono originalmente presente, considerando-se a camada de 0-20 cm.

Os incrementos no conteúdo do carbono orgânico do solo foram exclusivamente devido à incorporação do C derivado da vegetação $C_4$ (cultura introduzida), evidenciado pelo aumento do $\delta^{13}C$ (Tabela 18). Além disso, nota-se que essa incorporação é diferenciada para as profundidades estudadas, sendo que a mesma ocorre mais rapidamente na camada superficial, com o seu $\delta^{13}C$ aumentando mais velozmente.

Os resultados indicaram que a conversão do Cerrado arbóreo em sistemas cultivados resultou em modificações relacionadas ao estoque, com redução do Est.C em solos sob Agric+P15, enquanto que em solos sob pastagens há 30 anos verificou-se Est.C similares e/ou superiores, conforme a profundidade analisada, se comparados à solos sob vegetação nativa. Além disso, após a conversão dessas áreas, é sensível a substituição do C derivado MOS de espécies arbóreas $C_3$ pelo C da MOS derivado de gramíneas $C_4$ cultivadas. A conversão em pastagens foi acompanhada por alteração quantidade e na qualidade da MOS.

Portanto, os dados obtidos nesta cronossequência ajudaram a quantificar e melhor entender não apenas as variações do estoque, mas também a dinâmica da matéria orgânica quando ocorre a conversão do cerrado em sistemas cultivados considerando um período longo de tempo. As mudanças relacionadas à qualidade da MOS podem afetar as reações microbiológicas que controlam os ciclos biogeoquímicos do C, N e do P assim como as trocas gasosas entre o solo-atmosfera (NEILL et al., 1997). Existe uma mudança substancial da qualidade da matéria orgânica do solo e da comunidade de microrganismos do solo quando o C derivado de gramíneas substitui o C derivado da vegetação florestal original. As gramíneas

possuem maior concentração de lignina, componente não facilmente decomponível pela grande maioria de fungos e bactérias decompositores presentes no solo que consomem rapidamente proteínas, açúcares e celulose, produzindo nova biomassa e mais perda de C na forma gasosa (NEILL et al., 1997, RESCK et al., 2008). Desta forma, o cultivo contínuo de pastagens na área de estudo mostra seus efeitos ambientais através da diminuição do estoque e da qualidade da MOS.

**Tabela 18:** Carbono derivado de vegetação $C_3$ e $C_4$ em solos sob Vegetação Nativa de Cerrado (CN) e Sistemas Cultivados (Agric+P15 e P30) – Município de Uberlândia (MG), 2012.

| **Identificação / Pontos** (Uso atual) | **Profundidade** (cm) | **$\delta^{13}C$** (‰) | **Estoque de C** (Mg/ha de C) | **C derivado de Vegetação $C_3$** | | **C derivado de Vegetação $C_4$** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | (Mg/ha de C) | (%) | (Mg/ha de C) | (%) |
| **Solo sob Vegetação Nativa de Cerrado *(CN)*** | | | | | | | |
| CN /P1-1 | 0-15 | -26,30 | 33,09 | 33,09 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P1-2 | 15-30 | -19,85 | 16,38 | 16,38 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P1-3 | 30-60 | -16,42 | 27,77 | 27,77 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P2-1 | 0-15 | -26,68 | 36,97 | 36,97 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P2-2 | 15-30 | -24,32 | 15,51 | 15,51 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P2-3 | 30-60 | -20,39 | 29,12 | 29,12 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P3-1 | 0-15 | -25,37 | 37,23 | 37,23 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P3-2 | 15-30 | -18,76 | 16,20 | 16,20 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P3-3 | 30-60 | -15,66 | 22,08 | 22,08 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P4-1 | 0-15 | -25,64 | 25,68 | 25,68 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P4-2 | 15-30 | -20,89 | 14,24 | 14,24 | 100 | 0 | 0 |
| CN/P4-3 | 30-60 | -17,08 | 29,66 | 29,66 | 100 | 0 | 0 |
| **Média – CN** | **0-15** | **-26,00** | **33,24** | **33,24** | **100** | **0** | **0** |
| **Média – CN** | **15-30** | **-20,96** | **15,58** | **15,58** | **100** | **0** | **0** |
| **Média – CN** | **30-60** | **-17,39** | **27,16** | **27,16** | **100** | **0** | **0** |
| **Solo sob Sistema Misto (Agricultura + Pastagem 15 anos) *(Agric+P15)*** | | | | | | | |
| Agric+P15 /P1-1 | 0-15 | -14,82 | 18,17 | 0,81 | 0,5 | 17,36 | 95,5 |
| Agric+P15 /P1-2 | 15-30 | -16,05 | 12,74 | 3,32 | 26,1 | 9,42 | 73,9 |
| Agric+P15 /P1-3 | 30-60 | -16,36 | 22,84 | 15,23 | 66,7 | 7,61 | 33,3 |
| Agric+P15 /P2-1 | 0-15 | -15,39 | 18,46 | 1,72 | 9,3 | 16,74 | 90,7 |
| Agric+P15 /P2-2 | 15-30 | -16,73 | 14,49 | 5,26 | 36,3 | 9,23 | 63,7 |
| Agric+P15 /P2-3 | 30-60 | -14,96 | 19,50 | 4,14 | 21,2 | 15,36 | 78,8 |
| Agric+P15 /P3-1 | 0-15 | -15,36 | 25,91 | 2,35 | 9,1 | 23,56 | 90,9 |
| Agric+P15 /P3-2 | 15-30 | -16,67 | 14,86 | 5,26 | 35,5 | 9,59 | 64,5 |
| Agric+P15 /P3-3 | 30-60 | -16,06 | 27,96 | 15,96 | 57,1 | 11,99 | 42,9 |
| Agric+P15 /P4-1 | 0-15 | -15,68 | 19,45 | 2,29 | 11,8 | 17,16 | 88,2 |
| Agric+P15 /P4-2 | 15-30 | -17,17 | 15,97 | 6,85 | 42,9 | 9,12 | 57,1 |
| Agric+P15 /P4-3 | 30-60 | -17,17 | 26,00 | 24,14 | 92,8 | 1,86 | 7,2 |
| **Média –Agric+P15** | **0-15** | **-15,31** | **20,50** | **1,79** | **7,7** | **18,71** | **91,3** |
| **Média – Agric+P15** | **15-30** | **-16,66** | **14,52** | **5,17** | **35,2** | **9,34** | **64,8** |
| **Média – Agric+P15** | **30-60** | **-16,14** | **24,08** | **14,87** | **59,5** | **9,21** | **40,6** |
| **Solo sob Pastagem 30 anos *(P30)*** | | | | | | | |
| P30 /P1-1 | 0-15 | -14,23 | 28,60 | -0,17 | 0 | 28,78 | 100 |
| P30 /P1-2 | 15-30 | -15,25 | 14,01 | 1,98 | 14,1 | 12,03 | 85,9 |
| P30 /P1-3 | 30-60 | -14,64 | 25,48 | 2,82 | 11,1 | 22,66 | 88,9 |
| P30 /P2-1 | 0-15 | -14,49 | 32,49 | 0,52 | 1,6 | 31,97 | 98,4 |
| P30 /P2-2 | 15-30 | -15,69 | 19,40 | 4,04 | 20,8 | 15,36 | 79,2 |
| P30 /P2-3 | 30-60 | -14,68 | 24,87 | 3,03 | 12,1 | 21,85 | 87,9 |
| P30 /P3-1 | 0-15 | -13,64 | 29,96 | -1,69 | 0 | 31,65 | 100 |
| P30 /P3-2 | 15-30 | -14,75 | 20,35 | 1,36 | 6,7 | 18,99 | 93,3 |
| P30 /P3-3 | 30-60 | -14,63 | 29,54 | 3,16 | 10,7 | 26,38 | 89,3 |
| P30 /P4-1 | 0-15 | -13,94 | 24,42 | -0,75 | 0 | 25,17 | 100 |
| P30 /P4-2 | 15-30 | -14,78 | 17,68 | 1,26 | 7,1 | 16,42 | 92,9 |
| P30 /P4-3 | 30-60 | -14,57 | 24,97 | 2,16 | 8,7 | 22,81 | 91,3 |
| **Média - P30** | **0-15** | **-14,08** | **28,87** | **-0,52** | **0,4** | **29,39** | **99,6** |
| **Média - P30** | **15-30** | **-15,12** | **17,86** | **2,16** | **12,2** | **15,70** | **87,8** |
| **Média - P30** | **30-60** | **-14,63** | **26,22** | **2,79** | **10,7** | **23,43** | **89,4** |

### *4.5.2. Evolução das frações estável ($C_3$ estável) e biodegradável ($C_3$ lábil) do carbono derivado da vegetação nativa*

A acumulação do C no solo é considerada finita e está baseada em mecanismos de proteção que determinam sua estabilização (ROSCOE et al., 2001, ALVES et al., 2008). A proteção está associada aos minerais e a estrutura do solo. Na cronossequencia estudada houve elevada substituição do C originado do Cerrado pelo C originado da pastagem, sugerindo que a dinâmica do C orgânico é rápida e que, em 30 anos, praticamente desapareceu do solo a matéria orgânica da vegetação nativa. Esta rápida ciclagem pode estar relacionada com a textura arenosa do Latossolo que apresenta teor médio de areia de 77,7% e desestruturada (estrutura maciça) dominante na área. Trabalhos anteriores relataram a estreita relação entre a distribuição dos compartimentos lábeis e estáveis da matéria orgânica com a composição argilosa e a microagregação dos Latossolos tropicais, os quais protegem por oclusão a MOS e diminuem a taxa de *turnover* (FELLER; BEARE, 1997; SHANG; TIESSEN, 1997; ROSCOE et al., 2001).

Tem sido proposto em diferentes modelos do ciclo do carbono que a matéria orgânica do solo é composta por duas fases, uma "estável", resistente à decomposição e mineralização, e outra "biodegradável", menos resistente (VAN VEEN; PAUL, 1981; BALESDENT et al., 1987). Então a decomposição da matéria derivada da vegetação nativa pode ser descrita em termos de uma equação exponencial de 1ª ordem. Do mesmo modo, a entrada do carbono derivado da pastagem nesse solo, pode também ser descrita por uma equação exponencial de 1ª ordem, como descrito na metodologia.

Os resultados obtidos mostram elevada taxa de *turnover* no sistema no qual o compartimento lábil da MOS do Cerrado foi progressivamente decaindo com a introdução da pastagem e que apenas uma pequena fração estável (recalcitrante) permaneceu invariável no sistema (Figura 22).

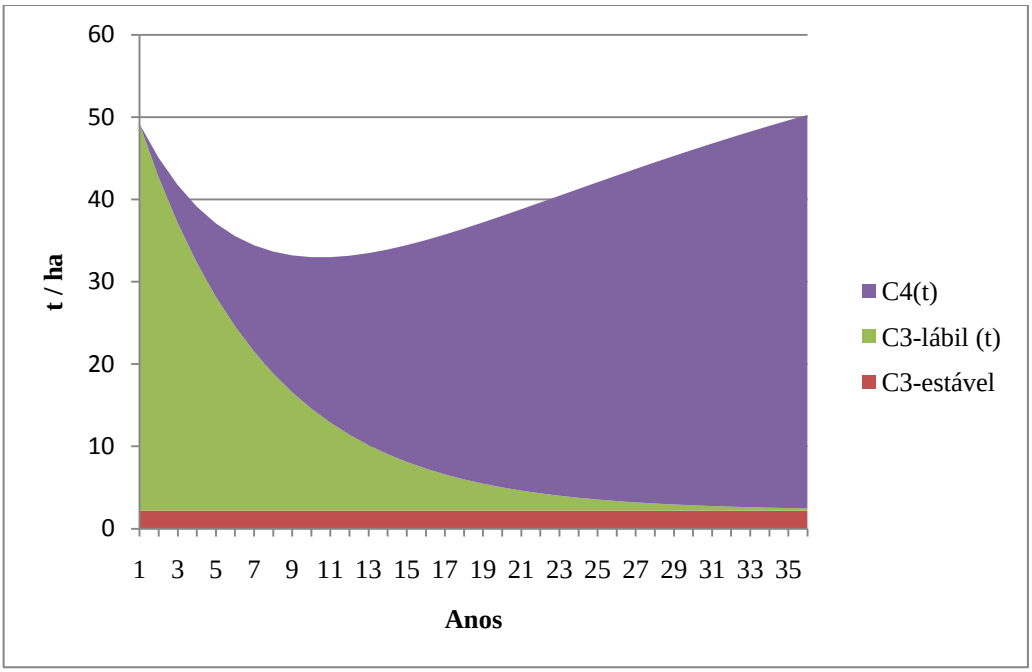



**Figura 22:** Evolução das frações estável ($C_3$ estável) e biodegradável ($C_3$ lábil) do carbono derivado da vegetação nativa, e do carbono derivado de vegetação $C_4$ em solos sob introdução de sistemas cultivados – Município de Uberlândia (MG), 2012.

Inicialmente, no Cerrado, a fração potencialmente biodegradável do total de C representava 47 t/ha. Com a rápida degradação, acelerada possivelmente pela textura do solo, elevada temperatura e precipitação e atividade biológica, restou apenas 6% do seu conteúdo original após 30 anos de pastagem. Estimou-se que a taxa de incorporação anual do C derivado de vegetação $C_4$ no sistema foi de aproximadamente 2,4 t/ha, valor que representa mais da metade do conteúdo total de carbono do solo após 10 anos de cultivo. Comparativamente, restou muito pouco da MO da vegetação nativa, considerada como o compartimento estável, calculada em cerca de 2,2 t/ha de C. A fração recalcitrante pode estar preservada na forma

pequenos fragmentos de carvão (são comuns incêndios episódicos no cerrado) ou por oclusão nas argilas e microagregados do solo (CERRI et al., 1985, ROSCOE et al., 2001).

Cerri e Andreux (1990) apresentaram resultados interessantes ao compararem duas cronossequencias, a primeira constando de duas áreas de plantio de cana-de-açúcar, com 12 e 50 anos de idade, localizada em Piracicaba, SP; e a segunda, localizada perto de Manaus, AM, constituída de duas áreas com pastagem com 2 e 8 anos de idade. As áreas descritas pelos autores apresentaram uma rápida perda do C derivado da vegetação nativa, sendo que a fração estável do solo sob pastagem na Amazônia é duas vezes maior que no solo sob cana, 50,2 e 20,9 t/ha, representando 56% e 30% do conteúdo total de carbono, respectivamente. As taxas de incorporação também são maiores na Amazônia do que em São Paulo, aproximadamente, 7,5 vezes. Em relação às taxas de decomposição estimadas, a área sob cana apresenta uma taxa aproximadamente 10 vezes menor que na Amazônia. Dessas condições resultam os diferentes padrões de evolução observados para as duas áreas. Na área sob pastagem na Amazônia, o aumento observado no estoque de carbono é explicado pela alta taxa de incorporação do C derivado da vegetação $C_4$ e pelo predomínio da fração estável no derivado da vegetação $C_3$. A diminuição do estoque de carbono na área sob cana pode ser explicada pela baixa taxa de incorporação do C derivado da vegetação $C_4$ e pela menor proporção da fração estável do C derivado da vegetação $C_3$.

Os resultados na área estudada estão confrontados com os resultados encontrados por Cerri e Andreux (1990) na tabela 19.

**Tabela 19:** Variações dos conteúdos de carbono segundo sua origem, para a camada de 0-30 cm em t/ha, numa cronossequencia de introdução de sistemas cultivados no Cerrado Mineiro, em comparação com os dados apresentados por Cerri e Andreux (1990) em São Paulo (Canavial) e na Amazônia (Pastagem).

| | **São Paulo (Canavial)** | | | **Amazônia (Pastagem)** | | | **Cerrado Mineiro (Sistemas cultivados)** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **VN** | **12 anos** | **50 anos** | **VN** | **2 anos** | **8 anos** | **VN** | **20 anos (Agric.+P15)** | **30 anos (P30)** |
| **C-Total** | 71,9 | 44,6 | 30,5 | 90,0 | 68,8 | 96,0 | 49,0 | 35,02 | 46,73 |
| **$CdVC_3$** | 71,9 | 36,0 | 21,0 | 90,0 | 54,8 | 50,2 | 49,0 | 7,0 | 1,6 |
| **$CdVC_3e$** | | 20,9 | | | 50,2 | | | 2,2 | |
| **$CdC_4$** | 0 | 8,6 | 17,3 | 0 | 14,0 | 45,8 | 0 | 28,05 | 45,09 |
| **$q_0$** | | 0,96 | | | 7,50 | | | 2,39 | |
| **k*f*** | | 0,101 | | | 1,079 | | | 0,148 | |

VN = vegetação nativa; C-Total = conteúdo total de carbono no solo; $CdVC_3$ = conteúdo de carbono derivado da vegetação $C_3$; $CdVC_3e$ = fração estável do carbono derivado da vegetação $C_3$; $CdC_4$ = carbono derivado da vegetação $C_4$ (cultura introduzida); $q_0$ = entrada anual de carbono no sistema (t/ha); k*f* = constante de decomposição do carbono derivado da vegetação $C_3$.

A área estudada apresenta uma situação diferente em relação às outras duas visto que apresenta predominância da fração biodegradável no $CdVC_3$ e alta taxa de incorporação do $CdC_4$, o que poderia conduzir a um comportamento diferente dos observados nas áreas sob cana e pasto.

O baixo valor verificado nos estoques de C para a área do Cerrado mineiro pode ser explicado pela taxa relativamente alta de entrada anual de C no sistema (~2,39) somada à baixa taxa de decomposição estimada (~0,148).

O modelo utilizado constitui-se num modelo aproximativo. Trata-se de uma expressão de resultados para procurar entender melhor esse complexo processo de decomposição da matéria orgânica do solo. A simulação matemática é apenas teórica, baseada, contudo, em dados reais. A consideração de uma fração estável ($CdVC_3e$) é uma simplificação de uma cinética complexa. Porém, é mais coerente supor que a matéria orgânica é constituída de um único compartimento.

## 4.6. Variação do Estoque de Carbono Orgânico do Solo após Mudança de Uso: Teste de Meta-Análise Incluindo Algumas Situações no Cerrado Mineiro

### *4.6.1. Análise do banco de dados*

Na análise dos 164 perfis de solos selecionados na região do Cerrado mineiro, 26,8% (44 perfis) apresentaram dados de estoque de C (caso 1, 3, 5 e 7, Figura 23), independente da existência ou não das outras variáveis; 7,3% (12 perfis) apresentaram dados de densidade do solo e teor de C, sendo possível, portanto, calcular o Est.C (caso 2, Figura 23). No entanto, 65,9% (108 perfis) não apresentavam dados de Est.C nem densidade do solo, independente da existência ou não de apresentarem o teor de C (casos 4 e 8, Figura 23). Neste caso a Ds foi estimada mediante a utilização de equações geral (BERNOUX et al., 1998, p.4) e específica (STATSOFT, 1996), nas quais consideraram o tipo e as características físicas do solo. Nenhum dos perfis que compuseram o banco de dados deixou de apresentar números referentes ao teor de C e/ou Est. C (caso 6, Figura 23) e não foram incluídos perfis que não apresentasse nenhum dos dados (caso 8, Figura 23), tendo em vista que um dos critérios básicos para seleção das referências científicas utilizadas na elaboração do banco de dados era apresentar resultados e discussões sobre a variação do teor e/ou estoque de C no solo.

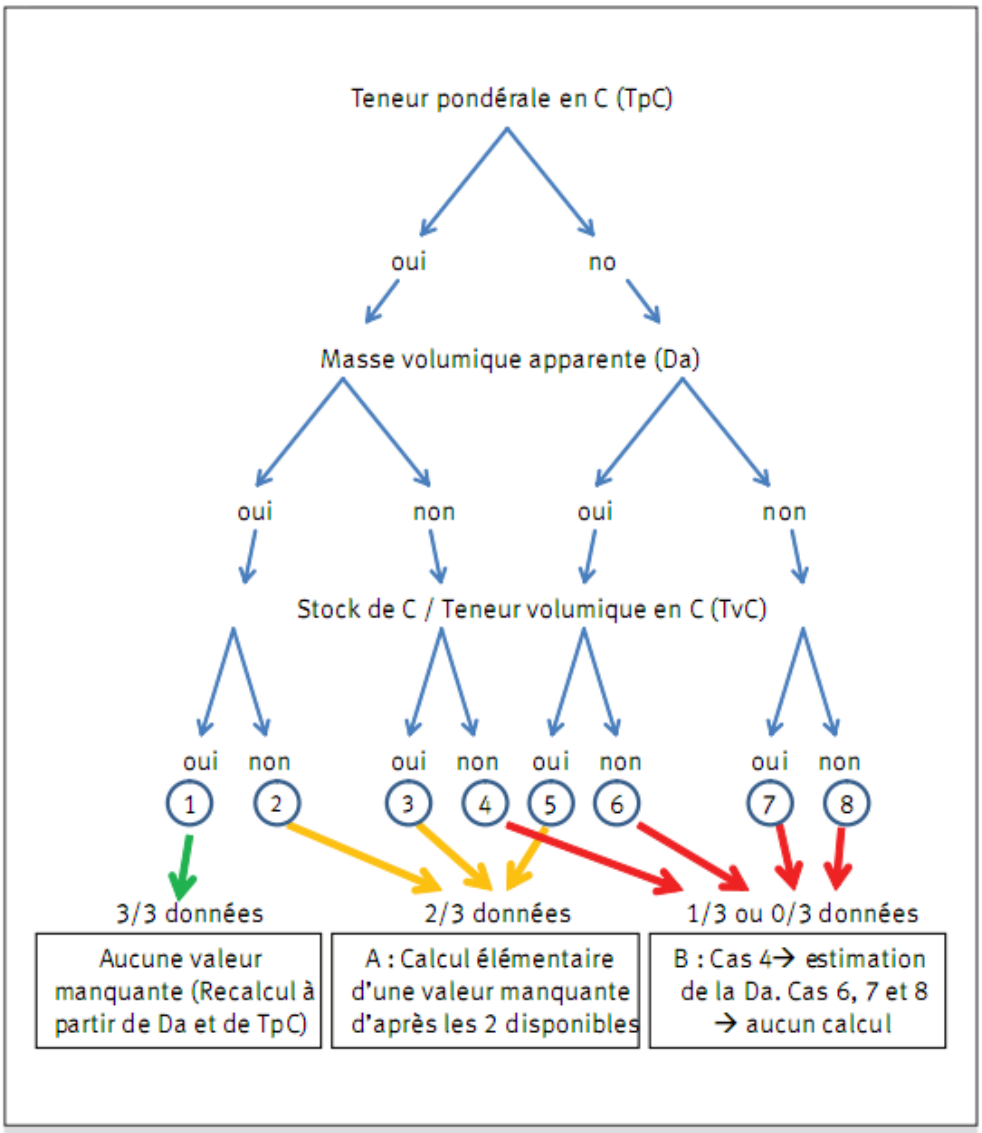



**Figura 23:** Procedimento do cálculo de Estoques de carbono (Est.C): Caso 1, recálculo do estoque a partir da densidade e do teor de C; Casos 2 e 5, cálculo elementar; Caso 3, cálculo da Ds a partir de dados do estoque de C e do teor de C; Caso 4, determinação da Ds em função de equações (BERNOUX et al., 1998, p.4); Caso 6, nenhum cálculo, apenas o estoque é levado em conta.
Fonte: Marco et al. (2010, p.27).

Todos os perfis de solo estudados se localizam no meio tropical, no Cerrado mineiro (clima do tipo Aw na classificação de Köeppen). Tais solos foram predominantemente Latossolos (*Oxisol*) – 76,8%, e em menores proporções, perfis de solo Podzólico (*Alfisol*) – 9,8%, Cambissolo (*Inceptisol*) – 4,3%, Litólico (*Lithic*) – 4,3%, Areia Quartzoza (*Psamment*) – 1,2%, Glei (*Aquic*) – 1,2%, Orgânico (*Histosol*) – 0,6% e Aluvial (*Entisol-Fluvent*) – 0,6%. Outras classes, não especificadas, representaram apenas 1,2% do total.

### *4.6.2. Impacto da conversão sobre o estoque de carbono orgânico do solo*

O impacto do desmatamento sobre o estoque de carbono orgânico do solo (COS) variou em função do tipo de uso do solo estabelecido. A meta-análise realizada mostrou a variação, expressa em Megagrama de C por hectare (Mg/ha de C), do estoque de carbono no solo após a conversão do solo sob Cerrado em agricultura, pastagem (natural e cultivada), reflorestamento e sistema misto, bem como a conversão de uso entre os sistemas cultivados – Agricultura vs Pastagem (natural e cultivada), Reflorestamento e Sistema misto; Pastagem natural vs Reflorestamento, Sistema misto e Pastagem cultivada; Reflorestamento vs Sistema misto e Pastagem cultivada e Sistema misto vs Pastagem cultivada.

A maneira mais usual de apresentar os resultados de uma meta-análise é o gráfico chamado *forest plot* (Figura 24). Para cada estudo, o gráfico apresenta a medida de efeito e seu intervalo de confiança, representado por uma linha vertical (barras de erro), sendo que quanto maior esta linha, maior é a variabilidade dentro do estudo; e quando o intervalo não interseciona o valor zero indica diferenças significativas a 5%. As barras de erro representam intervalos de 95% de confiança para diferenças de médias das diferentes ocupações do solo.

Na conversão de Cerrado para Agricultura, o COS tem um aumento significativo de 11,8 Mg/ha de C (dp.= 24,6) nos primeiros 30 cm do solo. Porém, não há nenhum aumento significativo no COS por massa equivalente de solo. Quando o Cerrado foi convertido em Pastagem natural houve diferença estatisticamente significativa, com decréscimo do COS de 9,3 Mg/ha de C (dp. = 19,8) nos primeiros 30 cm do solo, e de 9,9 Mg/ha de C (dp. = 20,8) por massa equivalente de solo (Figura 24).

A conversão de terras sob Agricultura em Pastagem natural também causou significativa redução do COS, independente do tipo de análise considerada (espessura ou massa equivalente de solo). Houve um decréscimo expressivo de 21,1 Mg/ha de C (dp. = 21,6) nos primeiros 30 cm do solo, e de 19,1 Mg/ha de C (dp. = 24,0) por massa equivalente de solo. Quando solos sob Agricultura são convertidos para Sistema misto, considerando os primeiros 30 cm do solo, tem-se uma redução significativa de 11,7 Mg/ha de C (dp. = 25,8); e quando convertidos para Pastagem cultivada um decréscimo de 7,5 Mg/ha de C (dp. = 24,9).

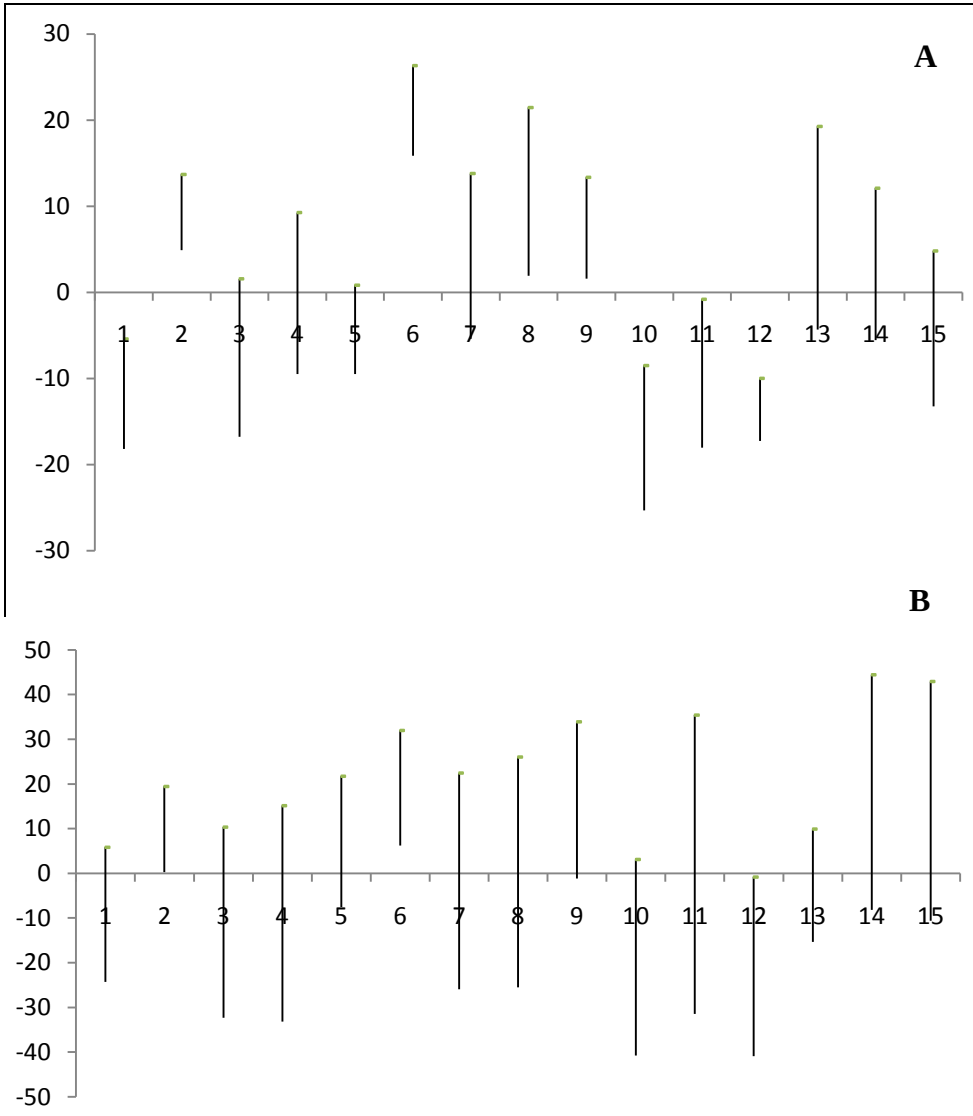
Houve nitidamente significativa redução de COS quando áreas sob Cerrado ou Agricultura foram convertidas em Pastagem natural. No entanto, houve expressivo acréscimo de COS quando Pastagens naturais foram transformadas em Reflorestamento, Sistema misto e Pastagem cultivada. Quando convertida em Reflorestamento o aumento de COS foi de 16,9 Mg/ha de C (dp. = 19,7); para Sistema misto tem-se um acréscimo de 9,4 Mg/ha de C (dp. = 21,1); e para Pastagem cultivada um aumento de 13,6 Mg/ha de C (dp. = 20,2) nos primeiros 30 cm do solo. Considerando a massa equivalente de solo também houve um acréscimo significativo de 20,9 Mg/ha de C (dp. = 22,0) quando solos sob Pastagem natural foram convertidos em Pastagem cultivada.

Os resultados mostraram que, considerando os primeiros 30 cm do solo, a conversão de um solo sob Cerrado, Agricultura, Reflorestamento, Sistema misto ou Pastagem cultivada em uma Pastagem natural induziu a uma redução significativa do COS.

Essas perdas do COS a partir da mudança de uso de solos sob Cerrado, Agricultura e Pastagem cultivada em uma Pastagem natural também se mostraram significativas na análise por massa equivalente do solo. No entanto, o fato de não ter dado um maior número de

diferenças significativas nesta análise se deve à grande variabilidade interna entre os valores dos diferentes trabalhos analisados, com elevado desvio padrão (~40/50% da correspondente média), o que pode mascarar as possíveis diferenças entre os meios. A única diferença significativa a nível de 5% foi entre agricultura e pastagem, pois o tamanho amostral da pastagem é bem maior se comparado aos demais.

Os métodos de meta-análise têm sido utilizados com sucesso em ecologia e pedologia. Johnson e Curtis (2001) usaram a meta-análise para mostrar o efeito das práticas silviculturais sobre os estoques de carbono e nitrogênio no solo. Gurevitch e Hedges (2001) apresentaram as vantagens do método de meta-análise para resolver problemas complexos, onde os dados disponíveis são limitados e onde a análise dos fenômenos deve levar em conta tanto os efeitos do tempo, das diferentes populações e dos diferentes tratamentos. No entanto, o método continua a ser limitado no âmbito do estudo de COS na América Latina (MARCO et al., 2010). O número de repetições ainda é considerado baixo e não geograficamente representativo para poder ampliar o discurso para diferentes zonas ecológicas e diferentes tipos de mudanças de uso da terra na região.




**Legenda:**

1. Cerrado vs Agricultura *
2. Cerrado vs Pastagem natural *
3. Cerrado vs Reflorestamento
4. Cerrado vs Sistema misto
5. Cerrado vs Pastagem cultivada
6. Agricultura vs Pastagem natural *
7. Agricultura vs Reflorestamento
8. Agricultura vs Sistema misto *
9. Agricultura vs Pastagem cultivada *
10. Pastagem natural vs Reflorestamento *
11. Pastagem natural vs Sistema misto *
12. Pastagem natural vs Pastagem cultivada *
13. Reflorestamento vs Sistema misto
14. Reflorestamento vs Pastagem cultivada
15. Sistema misto vs Pastagem cultivada

➢ O número de trabalhos e/ou perfis analisados para cada uso do solo: Cerrado = 21; Agricultura = 19; Pastagem natural = 63; Reflorestamento = 5; Sistema misto = 6; Pastagem cultivada = 36.

**Legenda:**

1. Cerrado vs Agricultura
2. Cerrado vs Pastagem natural *
3. Cerrado vs Pastagem cultivada
4. Cerrado vs Reflorestamento
5. Cerrado vs Sistema misto
6. Agricultura vs Pastagem natural *
7. Agricultura vs Pastagem cultivada
8. Agricultura vs Reflorestamento
9. Agricultura vs Sistema misto
10. Pastagem natural vs Reflorestamento
11. Pastagem cultivada vs Reflorestamento
12. Pastagem natural vs Pastagem cultivada *
13. Pastagem natural vs Sistema misto
14. Pastagem cultivada vs Sistema misto
15. Reflorestamento vs Sistema misto

➢ O número de trabalhos e/ou perfis analisados para cada uso do solo: Cerrado = 21; Agricultura = 18; Pastagem natural = 68; Reflorestamento = 5; Sistema misto = 9; Pastagem cultivada = 14.

**Figura 24:** *Forest plot* – Meta-análise mostrando a variação do estoque de carbono orgânico do solo por profundidade de 0-30 cm (A) e por massa equivalente de solo (B) após desmatamento. As barras de erro representam intervalos de 95% de confiança para diferenças de médias das diferentes ocupações do solo; * indica diferenças significativas a 5% (o intervalo não interseciona o valor zero).

Embora esta meta-análise seja limitada a alguns tipos de mudanças de uso da terra e a parte superficial do solo – embora nesta profundidade sejam esperadas as maiores concentrações e/ou perdas relacionadas ao uso – ela sugere claramente que a conversão da vegetação nativa de Cerrado em sistemas cultivados induziu a alterações significativas no conteúdo de carbono do solo.

Vale destacar que os resultados podem ser melhorados a partir do acréscimo do número de referências o que permitiria aumentar o número de comparações e considerar melhor o efeito de outros fatores sobre as variações de C. Por outro lado, o melhoramento dos métodos de análise estatística permitiria a produção de resultados mais precisos. A utilização de modelos específicos da dinâmica do C permite também calcular de maneira mais rigorosa as variações do estoque de carbono e acompanhar sua evolução (MARCO et al., 2010).

# CONCLUSÕES

# CONCLUSÕES

As áreas recobertas pela vegetação de Cerrado foram e continuam sendo substituídas principalmente por sistemas agrícolas e pastagens. No mundo, a conversão dos ecossistemas naturais em sistemas cultivados e os processos de degradação dos solos resulta na perda de 55 a 90 Pg de C (LAL, 2006), bem como mudanças marcantes, qualitativas e quantitativas, da matéria orgânica do solo (CAMPBELL,1978; ANDREUX; CERRI, 1989).

De modo geral, os níveis de matéria orgânica do solo diminuem quando sistemas nativos são utilizados para cultivo, pois ocorrem profundas alterações no fluxo e na natureza do carbono, assim como influência nos ciclos da água e dos outros elementos, resultando em mudanças dos parâmetros de qualidade do solo e degradação. Alterações na temperatura, umidade, aeração, absorção e lixiviação, observadas no solo como consequência do cultivo (SANCHEZ, 1976), além da destruição completa da liteira original, modificam a distribuição e a atividade da fauna e microbiota do solo (CERRI et al., 1985), influenciando assim o tempo de residência do C orgânico armazenado no solo. A diminuição dos valores de adição anual de C orgânico, decorrente do cultivo, bem como as altas taxas de decomposição, características das regiões tropicais, ocasionam um declínio do seu teor, antes em equilíbrio com a vegetação nativa, resultando em grande emissão de $CO_2$ e outros gases e perda da fertilidade química e física do solo.

Os resultados apresentados nesta pesquisa mostraram que a conversão da vegetação nativa em sistemas cultivados altera os atributos físicos do solo, os teores (%C) e o estoque (Mg/ha de C) de carbono orgânico; a natureza do carbono ($\delta^{13}C$) identificada através da substituição do carbono derivado da vegetação original $C_3$ por carbono de plantas $C_4$, derivado de restos

decompostos das culturas estabelecidas e, finalmente, o *turnover* da matéria orgânica.

Nos sistemas cultivados os valores de porosidade total (Pt) diminuíram e a densidade do solo (Ds) aumentaram, quando comparados aos valores determinados para solos sob vegetação nativa. O maior valor médio de Pt (de 0,42 $cm^3/cm^3$) foi encontrado na área de Cerrado natural (CN). As áreas cultivadas apresentaram menores valores de porosidade total, de 0,38$cm^3/cm^3$ e 0,37$cm^3/cm^3$, respectivamente, para o sistema misto (Agric+P15) e pastagem 30 anos (P30). Houve um decréscimo no volume de microporos nas áreas cultivadas (0,09 e 0,10 $cm^3/cm^3$ em Agric+P15 e P30, respectivamente) em relação aos solos sob CN (0,14$cm^3/cm^3$). No solo sob pastagem há 30 anos verificou-se um elevado valor de densidade (1,61$g/cm^3$), evidenciando que se trata de um solo mais compactado se comparado às demais áreas (1,51 $g/cm^3$ e 1,59 $g/cm^3$ em CN e Agric+P15, respectivamente).

No solo sob sistema misto (Agric+P15) houve um empobrecimento de teor de carbono (%C) especialmente em superfície se comparado à área sob vegetação nativa de Cerrado. No entanto, o solo recoberto com pastagem há 30 anos apresentou valores mais próximos daqueles encontrados na área sob vegetação nativa, tanto em superfície quanto em subsuperfície, o que evidencia a estabilidade do teor de carbono ao longo do tempo.

Houve decréscimo do estoque da MOS nas camadas superficiais (0-15cm) dos solos agrícolas, porém, na profundidade (30-60 cm) o estoque determinado em P30 (27,16 Mg/ha de C) se iguala ao estoque do solo sob Cerrado (26,22 Mg/ha de C). Em Agric+P15 foram determinados os menores estoques em todas as profundidades, sendo que há maiores incorporações de C na camada de 30-60 cm. Nota-se que todas as áreas estudadas – Cerrado, Sistema misto e Pastagem 30 anos – atingem, aparentemente, na camada de 30-60 cm, um

estado de equilíbrio ou, então, o estado não foi afetado em função do tempo curto de análise, mantendo níveis de carbono bem próximos. A técnica de manejo da pastagem otimiza o estoque de carbono, principalmente se considerar a constituição arenosa do solo (entre 70 e 83% de areia), porém não é eficiente em sequestrar o carbono.

A partir da conversão de uso, o carbono incorporado no solo derivado de plantas arbóreas de ciclo fotossintético $C_3$ que predominam no Cerradão (uma fitofisionomia do Cerrado) foi substituído por carbono de plantas $C_4$ derivado de restos decompostos das culturas estabelecidas. A identificação das fontes do carbono orgânico e a determinação do *turnover* da matéria orgânica do solo (MOS) ao longo do tempo foram obtidas usando parâmetros relacionados às mudanças na abundância natural do isótopo estável $^{13}C$. Mudanças no valor da $\delta^{13}C$ do SOC em áreas convertidas fornecem informações a respeito do papel funcional de ecossistemas tropicais no ciclo global do carbono.

Com base no uso do isótopo estável $^{13}C$ e na estimativa do carbono derivado da vegetação $C_3$ (em seus compartimentos estáveis e biodegradáveis) e $C_4$, foi possível avaliar o *turnover* da MOS e a eficiência da técnica de manejo do solo para o estoque de carbono em solos sob vegetação nativa e sob diferentes sistemas cultivados. Na profundidade de 0-15 cm, a média dos valores de $\delta^{13}C$ da MOS em Agric+P15 e P30 foram de -15,31 e -14,08‰, respectivamente, e diferem do valor encontrado para solos sob vegetação de Cerrado (-26‰). Os resultados mostraram que em Agric+P15 e em P30 houve incorporação do C derivado de vegetação $C_4$, ou seja, do C proveniente da cultura introduzida (gramíneas forrageiras), com o $\delta^{13}C$ tendendo ao longo do tempo a valores maiores, próximos a -12,5‰, observado para a braquiária.

Do total de carbono estocado nas camadas superficiais (0-15 cm), nos sistemas cultivados, foram determinados valores de 7,7% e 0,4% representando os remanescentes da vegetação nativa, respectivamente para as áreas sob sistema misto (Agric+P15) e pastagem há 30 anos. Portanto, a média de substituição da MOS derivada de plantas $C_4$ (em 0-15 cm) foi alta, sendo de 91,3% em Agric+P15 e de 99,6% em P30.

A aplicação do modelo de evolução do carbono orgânico baseado no $\delta^{13}C$ mostrou que o carbono derivado da vegetação nativa possui uma fração estável baixa (~2,2 tC/ha) quando comparada com a fração biodegradável. A decomposição da fração biodegradável foi relativamente rápida, apresentando após 30 anos de introdução de sistemas cultivados apenas 6% do seu conteúdo original.

Apoiando-se nos dados obtidos na cronossequência estudada conclui-se que a pastagem tecnicamente manejada apresenta um potencial para estocar carbono ao longo do tempo e, portanto, adequado para minimizar a emissão de GHGs. Por outro lado, a manutenção dos serviços ambientais do solo e do bioma depende igualmente da qualidade e biodegradabilidade da matéria orgânica, propriedade esta que parece ter sido profundamente afetada pela conversão de uso com possibilidade de deterioração das propriedades do solo para suportar a vida.

A fim de ampliar as discussões para além de uma única área de estudo, realizou-se uma meta-análise, a partir de dados da literatura científica incluindo diferentes áreas no Cerrado Mineiro. Esta técnica estatística mostrou variações do estoque de carbono do solo após mudança de uso. Considerando os primeiros 30 cm do solo, houve nitidamente significativa redução de COS quando áreas sob Cerrado, Agricultura, Reflorestamento, Sistema misto ou

Pastagem cultivada foram convertidas em Pastagem natural. O COS tem um aumento significativo de 11,8 Mg/ha de C (dp.= 24,6) quando solos sob Cerrado são convertidos para Agricultura, porém, quando convertidos em Pastagem natural há um decréscimo do COS de 9,3 Mg/ha de C (dp. = 19,8) nos primeiros 30 cm do solo.

Os solos apresentam um potencial de degradação maior ou menor mediante a atividade, o manejo e o tempo de uso do solo. Buscando o desenvolvimento agrícola sustentável na área de estudo, propõe-se incentivar os agricultores a adotar técnicas de manejo de conservação do solo, como por exemplo, a opção pelo plantio direto. Além disso, seria válido incentivar programas de recuperação de pastagens, como por exemplo, o estabelecimento de pastagens manejadas e/ou a adoção de sistemas de consórcio de pastagens e agricultura.

# REFERÊNCIAS

## REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Contribuição à Geomorfologia da Área dos Cerrados. In: Simpósio sobre o Cerrado, 1971, São Paulo. *Anais*... São Paulo: EDUSP, 1971. p.97-103.

ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. *Ciclagem de Carbono em Ecosistemas Terrestres – o Caso do Cerrado Brasileiro*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003, 30p. Disponível em: <www.cpac.embrapa.br/dowload/329/t>. Acesso em: Julho, 2009.

AGUILAR, R.; KELLY, E.F.; HEIL, R.D. Effects on cultivation on soils in northern Great Plains rangeland. *Soil Science Society of America Journal*, v.52, p.1081–1085, 1988.

AMADO, T. J. C.; RICE, C. W.; FABRIZZI, K.; NICOLOSO, R. S. O Solo Agrícola e o Mercado Internacional de Carbono. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). *Fundamentos da Matéria orgânica do solo:* Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654p.

ANDREOLA, F.; COSTA, L.M.; OLSZEVSKI, 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, p.857-865, 2000.

ANDREUX, F.; CERRI, C.C. Current trends in the research on soil changes due to deforestation, burning and cultivation in the Brazilian tropics. *Toxicological and Environmental Chemistry*, v.20, p.275-283, 1989.

ANDREUX, F.; CERRI, C.; VOSE, P.B.; VITORELLO, V.A. Potential of stable isotope, $^{15}N$ and $^{13}C$, methods for determining input and turnover in soils. In: HARRISON, A.F.; INESON P.; HEAL, O.W. (Eds.). *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems*: Fields Methods, Application and Interpretation. London: Elsevier, 1990. p. 259-275.

ANDREUX, F. Humus in world soils. In: PICCOLO, A. (Ed.). *Humic substances in terrestrial ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.45-100.

ANGERS, D. A.; CHENU, C. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. (Eds.). *Soil Processes and the Carbon Cycle*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997. p.199-206.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.337–345, 2004.

ARENA, A. *La porosidad de los terrones de suelo*. Buenos Aires: Comisión Nacional de Cultura, 1945.

ARROUAYS, D.; BALESDENT, J.; MARIOTTI, A.; GIRARDIN, C. Modelling organic carbon turnover in cleared temperate forest soils converted to maize cropping by using $^{13}C$ natural abundance measurements. *Plant Soil*, v.173, p.191-196, 1995.

BACCARO, C. A. D. Unidade Geomorfológica do Triângulo Mineiro. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v.3, n.5 e 6, p.37-42, 1991.

BACCARO, C. A. D.; FERREIRA, I. L.; ROCHA, M. R.; RODRIGUES, S. C. Mapa geomorfológico do Triângulo Mineiro: uma abordagem morfoestrutural-escultural. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v.13, n.25, p.115-127, Jan/Dez., 2001.

BAI, E.; BOUTTON, T.W.; LIU, F.; WU, B.X.; HALLMARK, C.T.; ARCHER, S.R. Spatial variation of $\delta^{13}C$ and its relation to carbon input and soil texture in a subtropical lowland woodland. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 44, p. 102–112, 2012.

BALBINO, L. C.; BROSSARD, M.; LEPRUN, J. C.; BRUAND, A. Mise en valeur des Ferralsols de la région du Cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques: une étude bibliographique. *Étude et gestion des sols*, v. 9, p. 83-104, 2002.

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

BALESDENT, J.; MARIOTTI, A.; BOISGONTIER, D. Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from $^{13}C$ abundance in maize fields. *Journal of Soil Science*, v.41, p.587-596, 1990.

BALESDENT, J.; BALABANE, M. Maize root-derived soil organic matter estimated by natural $^{13}C$ abundance. *Soil Biology and Biochemistry*, v.24, p.97-101, 1992.

_____. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v.28, p.1261-1263, 1996.

BALESDENT, J.; GIRARDIN, C.; MARIOTTI, A. Site-related $\delta^{13}C$ of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. *Ecology*, v.74, p.1713-1721, 1993.

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

BARBOSA O.; BRAUN O.P.G.; DYER R.C.; CUNHA C.A.B.R. *Geologia da região do Triângulo Mineiro*. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, 1970. 140 p. (Boletim 136).

BARBOSA, Gisláne Ferreira. *Plantas medicinais:* alternativa econômica a conservação do Cerrado brasileiro?. 2010 (Dissertação de Mestrado). Palmas: UFTO, 2010. 95f.

BARCELLOS, A. O. Sistemas extensivos e semi-intensivos de produção pecuária bovina de corte nos cerrados. In: PEREIRA, R. C.; NASSER, L. C. B. (Eds.). SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO. Agosto, 1996, Brasília. *Anais*... Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p.130–136.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de $CO_2$. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, p. 599-607, 2000.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, n. 7, p. 677-683, jul., 2004.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil and Tillage Research*, v.86, p.237–245, 2006.

BAYER, C. Desafios no manejo da material orgânica do solo e seqüestro de C na agricultura conservacionista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. *Palestras*... Gramado: SBCS, 2007. Disponível em: <http://www6.ufrgs.br/cbcs/palestras/CimelioBayer.pdf>. Acesso em: Fevereiro, 2010.

BEARE, M. H.; CABRERA, M. L.; HENDRIX, P. F.; COLEMAN, D. C. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional-tillage and no-tillage soils. *Soil Science Society American Journal*, v. 58, p. 787-795, 1994.

BENNER, R.; FOGEL, M. L.; SPRAGUE, E. K.; HODSON, R. E. Depletion of $^{13}C$ in lignin and its implication for stable carbon isotope studies. *Nature*, v.329, p.708-710, 1987.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, v.62, p.743-749, 1998.

BERNOUX, M.; CERRI, C.C; NEILL, C.; MORAES, J.F.L. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma*, v.82, p.43-58, 1998b.

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

BERNOUX, M.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P.; SIQUEIRA NETO, M.; METAY, A.; PERRIN, A.; SCOPEL, E.; BLAVET, D.; PICCOLO, M.C. Influence du semis direct avec couverture végétale sur la séquestration du carbone et l´érosion au Brésil. *Bulletin Du Réseau Érosion*, v.23, p.323-337, 2004.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JÚNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas à do campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, p.155-163, 2004.

BESNARD, E.; CHENU, C.; BALESDENT, J.; PUGET, P.; ARROUAYS, D. Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation. *European Journal of Soil Science*, v.47, p.495-503, 1996.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Part 1 - Physical and mineralogical methods. Madison: ASA, 1986. p.363–375.

BOIN, C. Produtividade em gado de corte: evolução e perspectivas. *Preços Agrícolas*, Piracicaba, v.138, p.8–11, 1998.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GIROUX, M.; LAVERDIÈRE, M. R. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (Zea mays L.). *Plant Soil*, v.215, p.85-91, 1999.

BRAIDA, J. A. *Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto*. 2004. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) UFSM. Santa Maria, 2004.

BRASIL. Ministério do Exército. Diretoria de Serviço Geográfico – DSG. *Carta militar*. Folhas SE-22-Z-D-II-2-NE - Cachoeira do Panga e Folha SE-22-Z-D-II-2-SE - Córrego da Estivinha. Brasília: DSG, 1983. (Escala 1:25.000).

BRITO, J. L. S. *Adequação das potencialidades do uso da terra na Bacia do ribeirão Bom Jardim no Triângulo Mineiro (MG):* Ensaio de Geoprocessamento. 2001. 184p. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

_____. Adequação das potencialidades do uso da terra na bacia do ribeirão Bom Jardim no triângulo mineiro (MG): ensaio de geoprocessamento. In: LIMA, S. do C., SANTOS, R. J. (Org.). *Gestão Ambiental da Bacia do Rio Araguari Rumo ao desenvolvimento sustentável.* Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia / Instituto de Geografia; Brasília: CNPq, 2004. p. 45 – 68.

BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. *Natureza e propriedade dos solos*. 5ed. Trad. A. B. N. Figueiredo Filho. Rio de Janeiro: Biblioteca Universitária Freitas Bastos, 1979. 647p.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. *Mecânica dos solos*. São Carlos: USP, EESC, 1998, v. 1, 131p.

BUSTAMANTE, M. C. M.; CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; ROSCOE, E. Soil Carbon Storage and Sequestration Potential in the Cerrado Region of Brazil. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, E. *Carbon Sequestration in Soils of Latin America*. Haworth Press, 2006. p. 285-304.

CADAVID GARCIA, E. A. Desenvolvimento Econômico Sustentável do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.30, n.6, p.759-774, jun., 1995.

CADISCH, G.; GILLER, K. Estimating the contribution of legumes to soil organic matter build up in mixed communities of $C_3$/ $C_4$ plants. *Soil Biology and Biochemistry*, v.28, p.823-825, 1996.

CALDEIRA, K.; MORGAN, G.; BALDOCCHI, D.; BREWER, P.; CHEN, C. T. A.; NABUURS, G. J.; NAKICENOVIC, N.; ROBERTSON, P. A. Portifolio of carbon management options. In: FIELD, C. B; RAUPACH, M. (Ed.). *Towards $CO_2$ Stabilization:* Issues, Strategies, and Consequences. A SCOPE report. Scientific Committee on Problems in the Environment. Washington, DC: Island Press, 2004. p. 103-129.

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

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, v.56, p.777-783, 1992.

CAMPBELL, C.A. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. In: SCHINITZER, M.; KHAN, S.U. (Eds.). *Soil organic matter*. New York: Elsevier, 1978. p.173-271.

CARVALHO, P.G.S. As Veredas e sua importância no domínio dos cerrados. *Informe Agropecuário*, v.168, p.47-54, 1991.

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.; RAUCCI, G.S.; CERRI, C.E.P.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; WRUCK, F.J.; CERRI, C.C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil Tillage Research*, v.110, p.175-186, 2010.

CAVENAGE, A.; MORES, K.L.T.; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C; FREITAS, M.L.M; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico sob diferentes culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.23, p.997-1003, 1999.

CERRI, C.; FELLER, C.; BALESDENT, J.; VICTORIA, R.; PLENECASSEGNE, A. Application du traçage isotopique naturel en $^{13}C$, à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *C.R. Acad. Sci. Paris*, v.11, n.9, p.423-428, 1985.

CERRI, C. C. *Dinâmica da matéria orgânica do solo no agrossistema cana de açúcar.* 1986. 197p. (Tese de Livre docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

CERRI, C.C.; ANDREUX, F.G. Changes in organic carbon content in oxisols cultivated with sugar cane and pastures based on $^{13}C$ natural abundance measurement. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14., Kyoto, 1990. *Anais...* Kyoto: ISSS, 1990. p. 98-103.

CERRI, C.C.; FELLER, C.; CHAUVEL, A. Evolução das principais características de um Latossolo Vermelho-Escuro após desmatamento e cultivo por doze e cinqüenta anos com cana-de-açúcar. *Cashiers ORSTOM:* Série Pedologie, v.26, p.37-50, 1991.

CERRI, C. E. P.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.; CERRI, C. C. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.67, p.1879–1887, 2003.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P.; LAL, R. Challenges and Opportunities of Soil Carbon Sequestration in Latin América. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, E. *Carbon Sequestration in Soils of Latin America.* Haworth Press, 2006. p.41-48.

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

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. *Sci. Agri.*, v.64, n.1, p.83-99, 2007.

CHONE, T.; ANDREUX, F.; CORREA, J. C.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Changes in organic matter in an oxisol from central Amazonian forest during eight years under pasture determined by $^{13}C$ compositon. In: BERTHELIN, J. (Ed.). *Diversity of environmental biogeochemistry*. New York: Elsevier, 1991. p. 397-405.

CLEPS JUNIOR, J.; PESSÔA, V. L. S.; GOBBI, W. A. de O. Gestão dos recursos hídricos em minas gerais: o comitê da bacia hidrográfica do rio Araguari. In: LIMA, S. do C., SANTOS, R. J. (Org.). *Gestão Ambiental da Bacia do Rio Araguari Rumo ao desenvolvimento sustentável*. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia / Instituto de Geografia; Brasília: CNPq, 2004. p.163 – 184.

CONCEIÇÃO, P. C. *Agregação e proteção da matéria orgânica em dois solos do Sul do Brasil*. 2006. 138f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.D.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.425–432, 1999.

CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; CARDOSO, A.; BERNOUX, M.; DOUZET, J.M.; NETO, M.S. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. *Global Change Biology*, Oxford, v. 12. n.9, p.1773-1787, 2006.

COSTA, F. de S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A. FONTOURA S. M. V. Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.2, p.587-589, mar-abr, 2004.

CRUZ, A.C.R.; PAULETO, E.A.; FLORES, C.A.; SILVA, J.B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, p.1105- 1112, 2003.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of oxisols from the Central Plateau of Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 48, n. 2, p. 341-346, 1984.

DALAL, R. C.; MAYER, R. J. Long-term trends in fertility of soil under continuons cultivation and cereal cropping in Southern Queensland: II. Total organic carbon and its rate loss from soil profile. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v. 24, p. 281-292, 1986.

DEINES, P. The isotopic composition of reduced organic carbon. In: FRITZ, P.; FONTES, J. C. (Eds.). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Amsterdam: Elsevier, v.1, 1980. p.329-406.

DESJARDINS, T.; ANDREUX, F.; VOLKOFF, B.; CERRIC, C.C. Organic carbon and $^{13}C$ contents in soils and soil size-fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. *Geoderma*, v.61, p.103-118, 1994.

DIAS JUNIOR, M. de; MIRANDA, E. E. V. de. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). *Ciência e Agrotec.*, Lavras. v.24. n. 2, p.337-346, 2000.

DIECKOW, J.; BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. Sistemas conservacionistas de preparo do solo e implicações no ciclo de carbono. *Documentos 12.* São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2004. 17 p. Disponível em: <http://www.cnpdia.embrapa.br/_publicacoes.html>. Acesso em: Setembro, 2009.

DON, Axel; SCHUMACHER, Jens; FREIBAUER, Annette. Impact of tropical land use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Global Change Biology*, v.17, p.1658–1670, 2011. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: ASA/SSSA, 1994. p. 3-21.

DUXBURY, J. M.; SMITH, M. S.; DORAN, J. W. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. (Eds.). *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. Honolulu: University of Hawaii Press, 1989.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, v.75, p.529-538, 1995.

EMBRAPA CERRADOS. *Embrapa Cerrados*: conhecimento, tecnologia e compromisso ambiental. Planaltina, 1999. 34p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 4).

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de métodos de análise de solo.* 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de solos*. Brasília: Embrapa, 1999. 412 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Agrobiologia. *Sequestro de Carbono em Solos Sob Sistemas Agropecuários Produtivos.* Seropédica, RJ, 2004, 2p. Equipe do projeto BODDEY, R.; ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S. S. Disponível em: <http://www.cnpab.embrapa.br/pesquisas/folders/folder_sequestro_carbono.pdf> Acesso em: Julho, 2011.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Cerrados Informa. *Manejo adequado do solo e sequestro de Carbono*. Fev. e Mar. 2005. Planaltina, DF. Disponível em: <http://www.cnpab.embrapa.br/publicacoes/download/bot013.pdf>. Acesso em: Junho, 2012.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Agência de Informação Embrapa. *Biodiversidade do Bioma Cerrado*. 2007. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_2_111200610412.html>. Acesso em: Agosto, 2011.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. SANTOS, Humberto Gonçalves dos [et al.], 3 ed. rev. Ampl., Brasília, DF : Embrapa, 2013. 353 p.

FAO. Food and Agriculture Organization. *Review of Evidence on Drylands Pastoral Systems and Climate Change: Implications and Opportunities for Mitigation and Adaptation.* Roma, 2009. Disponível em: <http://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i1135e/i1135e00.pdf>. Acesso em: Setembro, 2012.

FARAHBAKHSHAZAD, N.; DINNES, D. L.; CHANGSHENG, L.; JAYNES, D. B.; SALAS, W. Modeling biogeochemical impacts of alternative management practices for a row-crop field in lowa. *Agriculture Ecosystems & Environment* (In Press), v. 123, p. 30-48, 2008.

FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology*, v. 40, p. 503-537, 1989.

FEIGL, B.J.; MELILLO, J.; CERRI, C.C. Changes in the origin and quality of soil organic matter after pasture introduction in Rondônia (Brazil). *Plant Soil,* v.175, p.21-29, 1995.

FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, v. 79, p. 69-116, 1997.

FELTRAN FILHO, A. *A estruturação das paisagens nas chapadas do Oeste Mineiro*. 1997. 251p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FENG, H.; KURKALOVA, L. A.; KLING, C. L.; GASSMAN, P. W. *Environmental conservation in agriculture: Land retirement versus changing practices on working land* (04-WP 365). Ames, IA: Iowa State University Center for Agricultural and Rural Development. 2004. 38p. Disponível em: <http>//www.card.iastate.edu/publications/DBS/PDFFiles/04wp365.pdf>. Acesso em: Fevereiro, 2011.

FERNANDES, F.A. *Matéria orgânica e características físico-químicas de podzóis hidromórficos no pantanal mato-grossense*: Alterações pelo uso com pastagens cultivadas. 1993 (Dissertação de Mestrado). Piracicaba: CENA/USP, 1993. 74p.

FERNANDES, F. A.; CERRI, C. C.; FERNANDES, A. H. B. M. $^{13}C$ e a Dinâmica do Carbono Orgânico do Solo em Pastagem Cultivada no Pantanal Sul-mato-grossense. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 74. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2007.

FERREIRA, D. F. *Programa computacional Sisvar*. UFLA, versão 5.3, 2010.

FGTC – FORAGE AND GRAZING TERMINOLOGY COMMITTEE. Terminology for grazing lands and grazing animals. *Journal of Production Agriculture*, v. 5, p. 191-201, 1992

FIGUEIREDO, L. H. A. et al. Efeito dos manejos do solo na densidade do solo máxima e umidade ótima de um Latossolo Roxo. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 12, 1998, Fortaleza. *Resumos expandidos*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1998. p. 236-237.

FISHER, M.J.; RAO, M.I.; AYARZA,M.A.; LASCANO, C.E.; SANZ, J.I.; THOMAS, R.J.; VERA, R.R. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the Soth Amarican savanas. *Nature*, v.371, p.236-238, 1994.

FISHER, M.; THOMAS, R. Implications of land use change to introduced pastures on carbon stocks in the central lowlands of Tropical South America. *Environ. Dev. Sust*., v.6, p.111-131, 2004.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Agronomy Series, v. 9, 1986. p. 383-411.

GLASS, G.V. Primary, secondary, and meta-analysis of research. *Educational Researcher*. v. 5, p. 3-8, 1976.

GREGORICH, E. G.; ELLERT, B. H.; MONTREAL, C. M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural $^{13}C$ abundance. *Canadian Journal Science*, v. 75, p. 161-167, 1995.

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do Estado de São Paulo. *Bol. Téc. Inst. Agron*., Campinas, SP, v.19, n.21, 1960.

GUIMARÃES, A. J. M.; ARAÚJO, G. M.; CORRÊA, G. F. Estrutura fitossociológica em área natural e antropizada de uma vereda em Uberlândia, MG. *Acta Botânica Brasílica*, v. 16, p. 317-329, 2002.

GUO, L.B.; GIFFORD, R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, v.8, p.345–360, 2002.

GUREVITCH J., HEDGES L. V. Meta-analysis. Combining the results of independent experiments. In : SCHEINER, S. M., GUREVITCH, J. (dir.). *Design and Analysis of Ecological Experiments.* New York: États-Unis, Oxford University Press, 2001. p. 347-369. HASUI, Y. *Geologia das Formações Cretáceas do Oeste de Minas Gerais*. 1967. 87p. Tese (Doutorado em Ciências Geológicas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1967.

HILLEL, D. *Solo e água: fenômenos e princípios físicos*. Porto Alegre: UFRGS, 1970. 231p.

HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A. C.; MOREIRA, M. Z.; HARIDASAN, M. Specific leaf area explains differences in leaf treats between congeneric savanna and forest trees. *Functional Ecology*, v. 19, p. 932-940, 2005.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação.* Brasília, 1990. 96p.

_____. *Ecossistemas Brasileiros:* Projetos de Conservação e Manejo de Ecossistemas. 2003. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/ecossistemas/cerrado.htm. >. Acesso em: Agosto, 2011.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Atlas Geográfico Escolar*: Ensino Fundamental. Disponível em: <http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/biomas>. Acesso em: Agosto, 2014.

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. *Biodiversidade em Minas*. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/biodiversidade>. Acesso em: Março, 2014.

IGA – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS. Vegetação do Estado de Minas Gerais, Brasil. Disponível em: <http://sgc.bernoulli.com.br/projetodeensino/2012-1-b/geografia/vegetacao/> Acesso em: Dezembro, 2012.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Catálogo de imagens Landsat*. Imagens TM/Landsat de 5 de novembro de 2000, ponto 221/órbita 73. Disponível em: < http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Acesso em: Abril, 2011.

INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Fundação Estadual do Meio Ambiente.* Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2008 (Ano base 2005). 104p. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/inventario_gee%5B1%5D.pdf>. Acesso em: Novembro, 2009.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* – Agriculture, Forestry and Other Land Use. vol. 4. Hayama: IGES, Japan, 2006.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Cambio Climático 2007:* Mitigacíon del Cambio Climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Resumén Tecnico. 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg3_report_mitigation_of_climate_change.htm>. Acesso em: Abril, 2011.

IPCC/UNEP/OECD/IEA. Revised 1996 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories: Reporting Instructions (Vol.1); Workbook (Vol. 2); Reference Manual (Vol. 3). Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency, Paris, 1997.

IWATA, B.F.; LEITE, L.F.C.; ARAÚJO, A.S.F.; BRASIL, E.L.; COSTA, C.N.; CAMPOS, L.P.; SANTOS, F.S.R. Carbono total e carbono microbiano de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no cerrado piauiense. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 18, 2010, Teresina. *Anais...* Teresina: EMBRAPA Meio-Norte, 2010. CDRom.

JANTALIA, C. P.; ALVES, B. J. R; ZOTARELLI, L.; BODEY, R.M.; URQUIAGA, S.. Mudanças no estoque de C do solo em áreas de produção de grãos: avaliação do impacto do manejo de solo. In: ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S., AITA, C.; BODEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). *Manejo de sistemas agrícolas: impacto no seqüestro de C e nas emissões de gases do efeito estufa*. Porto Alegre: Embrapa Agrobiologia, 2006. p.35-57.

JASTROW, J. D.; BOUTTON, T. W.; MILLER, R.M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Science Society of America Journal*, v. 60, p. 801-807, 1996.

JENKINSON, D. S.; RAYNER, J. H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, v. 123, p. 298-305, 1977.

JENNY, H. *The Soil Resource.* New York: Springer-Verlag, 1980.

JEPSON, W. A disappearing bioma? Reconsidering land-use cover change in the Brazilian savanna. *The Geographical Journal*, v. 171, n. 2, p. 99-111, 2005.

JOHNSON D. W., CURTIS P. S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, v.140, n.2-3, p. 227-238, 2001.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: Inferences to improve soil quality. *Plant Soil*, v.338, p.467-481, 2011.

KAY, B.D.; VANDENBYGAART, A.J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil & Tillage Research*, v.66, p.107–118, 2002.

KIEHL, E.J. *Manual de edafologia*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KING, L. C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*. Rio de Janeiro. v.18, 1956.

KLAR, A.E. *A água no sistema solo – planta – atmosfera*. 2 ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.

KLEIN, V. A. *Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira*. Passo Fundo: ed. UPF, 2005. 61 p.

KLEIN, V. A.; MASSING, J. P.; CAMARA, R. K.; BIASUZ Jr., I. J.; SIMON, M. A. Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 15, 2004, Santa Maria. *Resumos expandidos*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.

KRUG, T.; FIGUEIREDO, H. B.; SANO, E. E.; ALMEIDA, C. A.; SANTOS, J. R.; MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; ANDRADE, S. M. A. *Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópica de Gases de Efeito Estufa Relatórios de Referência Emissões de Gases de Efeito Estufa da Queima de Biomassa no Cerrado Não-Antrópico Utilizando Dados Orbitais*. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, 2006. 52p.

LAL, R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by $CO_2$ – enrichment. *Soil & Tillage Research*, Amsterdan, v.43, p. 81-107, 1997.

_____. Global potential of carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Critical Reviews in Plant Sciences*, Boca Raton, v. 22, n. 2, p. 151-184, 2003.

_____. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation and Development*, v. 17, p. 197-209, 2006.

LAL, R.; PIRCE, F. J. The vanishing resource. In: LAL, R.; PIRCE, F. J. (Eds). *Soil management for sustainability*. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p.1-5.

LAL, R.; KIMBLE, J.; COLE, V. C.; FOLLETT, R. F. *The Potential of U.S. Cropland to Sequeser Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. Chelsea: Ann Arbor Press MI, 1998. 128p.

LARSON, W. E.; PIRCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W. et al. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: ASA/SSSA, 1994. p.37-51.

LEAMER, R. W.; SHAW, B. A simple apparatus for measuring non capillary porosity an extensive scale. *J. Am. Soc. Agron*., v.33, p.1003–1008, 1941.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; MACHADO, P. L. O. A. Simulação pelo modelo Century da dinâmica da matéria orgânica de um argissolo sob adubação mineral e orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 347-358, 2004.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 335p.

LIMA, S.do C.; QUEIROZ NETO, J.P. As veredas e a evolução do relevo. *Sociedade & Natureza***,** v. 15, p. 481- 488, 1996.

LIMA, S.do C.; QUEIROZ NETO, J.P.; LEPCSH, I. F. Os solos da chapada Uberlândia-Uberaba. In: LIMA, S. do C.; SANTOS, R. J. (Org.). *Gestão Ambiental da Bacia do Rio Araguari Rumo ao Desenvolvimento Sustentável*. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia / Instituto de Geografia; Brasília: CNPq, 2004. p.89-124.

LUDWIG, B.; JOHN, B.; ELLERBROCK, R.; KAISER, M.; FLESSA, H. Stabiliation of carbon from maize in a sandy soil in a long-term experiment. *European Journal of Soil Science,* v. 54, p. 117-126, 2003.

MACEDO, M.C.M. Pastagens no ecossistema do cerrado: pesquisas para o desenvolvimento sustentável. In: ANDRADE, R.P.; BARCELOS, A.O.; ROCHA, C.M.C. (Eds.). SIMPÓSIO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSSISTEMAS BRASILEIROS – PESQUISAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 32, Brasília, 1995. *Anais*... Brasília: SBZ, 1995. p.28-62.

MACEDO, M.C.M, Sustainability of pasture production in the Savanas of tropical America. In: PROCEDING OF THE XVII INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS. Session 21 - Temperate and Tropical Native Grassland. *Anais*... Winnipeg, Manitoba, Canadá, 1997. v.4, p.28-62.

MACEDO, M.C.M. Degradação de pastagens; conceitos e métodos de recuperação In: Sustentabilidade da pecuária de leite no Brasil. *Anais*..., Juiz de Fora. 1999. p.137-150.

MACEDO, M. C. M. Sistemas de produção animal em pasto nas Savanas Tropicais da América: Limitações à Sustentabilidade. In: Reunião Latinoamericana de Produccion Animal,16. Congreso Uruguayo de Produccion Animal, 3, 2000, Montevidéu. *Anales*... Argentina:Alpa. 2000. 1 CD-ROM.

MACEDO, J.; BRYANT, R. B. Morphology, Mineralogy, and Genesis of a hydrosequence of Oxisols in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 51, p.690-698, 1987.

MACHADO, Ricardo B.; NETO, Maria B. Ramos; PEREIRA, Paulo Gustavo P.; CALDAS, Eduardo F.; GONÇALVES, Demerval A.; SANTOS, Nazareno S.; TABOR, Karyn; STEININGER, Marc. *Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro*. Brasília: Conservação Internacional, Programa do Brasil, 2004, 26 p.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do Solo e a Mitigação da Mudança Climática Global. *Quim. Nova,* v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MAGALHÃES, A. C. N. Fotossíntese. In: FERRI, M. G. (Ed.). *Fisiologia Vegetal*. São Paulo: EPU, 1985. p.117-168.

MAIA, S.M.F.; OGLE, S.M.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. *Soil Tillage Res*., v.106, p.177-184, 2010.

MANN, L.K. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*, v.142, p.279-288, 1986.

MARCO, P.; HENRY, M.; BLAVET, D.; BERNOUX, M. Variation des stocks de carbone organique du sol après plantation forestière: essai de méta-analyse incluant quelques situations d'Amérique latine. *Bois et forêts dês Tropiques*, Stock de carbone et plantations, n.305 (3), 2010.

MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BRUNET, D.; BALBINO, L. C.; VILELA, L.; BROSSARD, M. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop-livestock management systems. *Soil Till. Res.*, v. 103, p. 442-450, 2009.

MARTHA JÚNIOR, G. B.; CORSI, M. Pastagens no Brasil: situação atual e perspectivas. *Preços Agrícolas*, Piracicaba, v.171, p.3–6, 2001.

MARTHA JÚNIOR, G.B.; VILELA, L. *Pastagens no Cerrado*: baixa produtividade pelo uso limitado de fertilizantes. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 32p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 50).

MARTIN, A.; MARIOTTI, A.; BALESDENT, J.; LAVELLE, P.; VUATTOUX, R. Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by $^{13}C$ natural abundance measurements. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 22, p. 517-523, 1990.

MARTINS, P.F.S.; CERRI, C.C.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F. Conseqüências do cultivo e do pousio sobre a matéria orgânica do solo sob floresta natural na Amazônia Oriental. *Acta Amazônica*, v.2, p.19-28, 1990.

MENDES, P. C. *Gênese e estrutura espacial das chuvas na cidade de Uberlândia / MG*. 2001. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

MIELNICZUK, J. Desenvolvimento de sistemas de culturas adaptadas à produtividade, conservação e recuperação de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 21., 1988, Rio de Janeiro, *CDRom...* Rio de Janeiro: SBCS, 1988.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. 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. Porto Alegre: Metrópole, 2008, cap.1, p.1-5.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. *Plano de ação para prevenção e controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado* - PPCERRADO. Brasília, DF, 2009.

_____. *O Bioma Cerrado*. 2010. Disponível em: http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado. Acesso em: Fevereiro, 2014.

MISHRA, U.; TORN, M.S.; MASANET, E.; OGLE, S.M. Improving regional soil carbon inventories: combining the IPCC carbon inventory method with regression kriging. *Geoderma*, v.189–190, p.288–295, 2012.

MORAES, J. F. L. *Conteúdos de carbono e tipologia de horizontes nos solos da bacia amazônica*. 1991. (Tese de Doutorado) – Centro de Energia Nuclear de Agricultura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, v.70, p.63-81, 1996.

MORAES, J.L.; CERRI, C.C.; MELILLO, J.M.; KICKLIGHTER, D.; NEILL, C.; SKOLE, D.L.; STEUDLER, P.A. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Sci. Soc. Am. J*., v.59, p. 244–247, 1995.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, p. 853-858, 2000.

NEILL, C.; CERRI, C.C.; MELILLO, J.M.; FEIGL, B.J.; STEUDLER, P.A.; MORAES, J.F.L.; PICCOLO, M.C. Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondônia. In: LAL, R., KIMBLE, J., FOLLET, R.F. (Eds). *Soil processes and the carbon cycle*. Advances in Soil Science, Boca Raton: CRC Press, 1997, p. 9-28.

NELSON, W. L.; BAYER, L. D. Movement of water through soils in relation to the nature of pores. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*., v.5, p.69-76., 1940.

NISHIYAMA, L. Geologia do Município de Uberlândia e Áreas adjacentes. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 1, n. 1, p. 9-16, jan/dez. 1989.

NISHIYAMA, L. *Procedimentos de mapeamentos geotécnicos como base para análise e avaliações ambientais do meio físico, escala 1:100.000 aplicada ao município de Uberlândia/MG*. 1998. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Calos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

NISHIYAMA, L.; BACCARO, C. A. D. Aproveitamento dos recursos minerais nas regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – Uma agressão ao meio ambiente. *Sociedade & Natureza,* Uberlândia, v. 1, n. 1, p. 49-52, jan/dez. 1989.

OADES, J. M.; GILLMAN, G. P.; UEHARA, G. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. In: COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. (Eds.). *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems.* Honolulu: Hawaii Press, 1989. p.69-95.

OADES, J. M. An overview of processes affecting the cycling of organic carbon in soils. In: ZEPP, R. G.; SONNTAG, C. (Eds.). *The Role of Non-Living Organic Matter in the Earth's Carbon Cycle*. Wiley, New York: Dahlem Workshop Reports, 1995. p.293-303.

OGLE, S.M.; BREIDT, F.J.; PAUSTIAN, K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry,* v. 72, p. 87-121, 2005.

OLIVEIRA, L. B. Coeficiente de permeabilidade de dois tipos de solo (aluvial) da Estação Experimental do Curado. *Bol. Téc.do Inst. Agron. Nordeste*, Recife, v.16, 1961.

OLIVEIRA, L.B. de. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Rio de Janeiro, v.3, p.197-200, 1968.

PARFITT, R. L.; THENG, B. K. G.; WHITTON, J. S.; SHERPHERD, T. G. Effect of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*, v. 75, p. 1-12, 1997.

PAULINO, V. T.; TEIXEIRA, E.M.L. *Sustentabilidade de Pastagens* – Manejo adequado como medida redutora da emissão de gases de efeito estufa. CPG – Produção animal sustentável, Ecologia de Pastagens, IZ, APTA/SAA, 2009.

PAUSTIAN, K.; BABCOCK, B. A.; HATFIELD, J.; KLING, C. L.; LAL, R.; MCCARL, B. A.; MCLAUGHLIN, S.; MOSIER, A. R.; POST, W. M.; RICE, C. W.; ROBERTSON, G. P.; ROSENBERG, N. J.; ROSENZWEIG, C.; SCHLESINGER, W. H.; ZILBERMAN, D. *Climate change and Greenhouse Gas Mitigation: Challenges and Opportunities for Agriculture.* Ames, IA: Council for Agricultural Science and Technology (Task Force Report No. 141). 2004. 120p. ISBN 1-887383-26-3.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J*., v. 51, p.1173-1179, 1987.

PECHE FILHO, A. Critérios para avaliar a qualidade do plantio direto. *O Agronômico*. IAC. Campinas. v.51, n. 1, 1999.

PEDREIRA, M.S.; PRIMAVESI, O. Atuações zooténicas para a adequação ambiental na bovinocultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA, João Pessoa, PB, 2008. *Anais...* João Pessoa, 2008. p. 1-14.

PEELE, T. C. Relation of percolation rates through satured soil cores to volume of pores drained in 15 and 30 minutes under 60 centimeters tension. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*., v.14, p.359-361, 1949.

PENDELL, D. L.; WILLIAMS, J. R.; RICE, C. W.; NELSON, R. G.; BOYLES, S. B. Economic feasibility of no-tillage and manure for soil carbon sequestration in corn production in Northeastern Kansas. *Journal Environmental Quality*, Madison, v. 35, p.1364-1373, 2006.

PEREIRA, K.G.O. A*s unidades Geomorfológicas na área dos relevos residuais no município do Prata – MG*. 1996 (Bacharelado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1996.

PLANTE, A. F.; FENG, Y.; MCGILL, W. B. A modeling approach to quantifying soil macroaggregate dynamics. *Can. J. Soil Sci.*, v. 82, p. 181-190, 2002.

POST, W. M.; KWON, K. C. Soil carbon sequestration and land-use change: process and potential. *Global Change Biology*, v. 6, p. 317-327, 2000.

POWLSON, D.S.; RICHE, A.B.; SHIELD, I.. Biofuels and other approaches for decreasing fossil fuel emissions from agriculture. *Annais of Applied Biology*, v.146, n.2, p.193-201, 2005.

POWLSON, D.S.; WHITMORE, A.P.; GOULDING, K.W.T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, v.62, p.42-55, 2011.

POWERS, J.S.; MARIFE, D.C.; TRACY, E.T.; VELDKAMP, E. Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v.108, n.15, p.6318–6322, 2011.

PROBIO. *Mapeamento da Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado:* Relatório Final. Brasília/DF. Junho, 2007. 93p.

RADAMBRASIL. *Levantamento dos Recursos Naturais*. Rio de Janeiro, Folha SE 22, Goiânia, v. 31, 1983.

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

REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; MARTINS, E. S. Solos do Bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. D; RIBEIRO, J. F. (Eds.). *Cerrado – Ecologia e Flora*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, v.1, 2008. p.107-133.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações.* Barueri: Manole, 2004, 478 p.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. *Ci. Rural*, v.36, p.1931–1935, 2006.

RESCK, D. V. S. O potencial de seqüestro de carbono em sistemas de produção de grãos sob plantio direto no Cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE PLANTIO DIRETO E MEIO AMBIENTE: Seqüestro de Carbono e Qualidade da Água, 1. Foz do Iguaçu. *Anais*... Foz do Iguaçu: FEBRAPDP/Itaipu Nacional, 2005. p. 72-80.

RESCK, D.V.S.; FERREIRA, 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.A.O. (Eds). *Fundamentos da matéria orgânica do solo*: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.359-417.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de. (Eds.). *Cerrado: ambiente e flora.* Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998. p. 89-166.

RICE, C. Introduction to special section on greenhouse gases and carbon sequestration in agriculture and forestry. *Journal Environmental Quality,* Madison, v. 35, p.1338-1340, 2006.

RICE, C.; REED, D. *Soil carbon sequestration and greenhouse gas mitigation:* a role for American agriculture. Bipartisan Policy Center, Library, report. 2007. 35p. Disponível em: < http://www.bipartisanpolicy.org/library/report/soil-carbon-sequestration-and-greenhouse-gas-mitigation-role-american-agriculture>. Acesso em: Maio, 2010.

RIZZINI, C.T. A flora do Cerrado: análise florística das savanas centrais. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 1962, São Paulo. *Anais...* São Paulo: EDUSP, 1963. p.125-177.

RODRIGUES, C.L.; ZIEGELMANN, P.K. Metanálise: Um guia prático. *Rev. HCPA*, v. 30, n.4, p. 436-447, 2010.

ROSA, R. *Introdução ao Sensoriamento Remoto*, 6. ed. Uberlândia: EDUFU, 2007.

ROSA, R., LIMA, S. C.; ASSUNÇÃO, W. L. Abordagem preliminar das condições climáticas de Uberlândia-MG. *Sociedade & Natureza,* v. 3, n. 5 e 6, p. 91-108, 1991.

ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; LIMA, E. F.; SIQUEIRA, A. C.; MACEDO, D. Elaboração de uma base cartográfica e criação de um banco de dados georreferenciados da Bacia do Rio Araguari - MG. In: LIMA, S. do C., SANTOS, R. J. (Org.). *Gestão Ambiental da Bacia do Rio Araguari Rumo ao desenvolvimento sustentável.* Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia / Instituto de Geografia. Brasília: CNPq, 2004. p. 69-87.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E.J.; VASCONCELLOS, C.A. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the $^{13}C/^{12}C$ isotopic ratio in a Cerrado Oxisol. *Geoderma*, v.104, p. 185-202, 2001.

SANAIOTTI, T. M.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; TRUMBORE, S. E.; CAMARGO, P. B. Past Vegetation Changes in Amazon Savannas Determined Using Carbon Isotopes of Soil Organic Matter. *Biotropica*, v. 34, n. 1, p.2-16, 2002.

SANCHEZ, P.A. *Properties and management of soils in the tropics.* New York: John Wiley & Sons, 1976. 618p.

SANCHEZ, P.A.; VILLACHICA, J.H.; BANDY, D.E. Soil fertility dynamics after clearing a tropical rainforest in Peru. *Soil Science Society of America. Journal*, v.47, p.1171-1178, 1983.

SANO, E.E.; BARCELOS, A.O.; BEZERRA, H.S. Assessing the spatial distribuition of cultivates pastures in the Brazilian savanna. *Pasturas Tropicales,* v. 22, n. 3, p. 2-15, 2002.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L.; FERREIRA Jr, L. G. *Mapeamento de cobertura vegetal do bioma Cerrado*: estratégias e resultados. Planaltina: Embrapa Cerrados. (Boletim de Pesquisa), 2007.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO J. L.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semi-detalhado (escala de 1:250.000) da cobertura vegetal antrópica do bioma Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 1, p. 153-156, 2008.

SANTOS, J.B. *Carbono e Nitrogênio em classes de solos com diferentes texturas e tempo de adoção do sistema de plantio direto – espacialização e contribuição do sistema.* 2010. Tese (Doutorado em Agronomia) UFPR. Curitiba, 2010.

SANTOS, L.; BACCARO, C.A.D. Caracterização Geomorfológica da Bacia do Rio Tijuco. *Caminhos de Geografia*, v.1, n.11, p.1-21, 2004.

SAVIDAN, Y.; JANK, J. DE; SOUZA, F. H. D.; BOOK, A. Preliminary evaluation of Panicum maximum germplasm in Brazil. In: INTERNATIONAL AGRONOMY RESEARCH PROGRAM. *Anais...* Proc. XVth. Int. Grassl. Congress, Kyoto, Japan, 1985. p.117-118.

SCHOLES, M. C.; POWLSON, D.; TIAN, G.; Input control of organic matter dynamics. *Geoderma*, Amsterdan, v. 79, n. 1/4, p. 25-47, 1997.

SEGNINI, A.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. P.; SILVA, W. T. L. da.; BOLONHEZI, D.; CERDEIRA, A. L. *Uso de métodos espectroscópicos para avaliar o seqüestro de carbono em áreas de rotação de culturas cana de açúcar / amendoim sob diferentes sistemas de plantio.* São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2004. 5 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Comunicado Técnico, 62). Disponível em: <http://www.cnpdia.embrapa.br/_publicacoes.html>. Acesso em: Outubro, 2009.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical Oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. *Soil Sci.*, v.162, p.795–807, 1997.

SILVA, J. E. da.; RESCK, D. V. S. Matéria orgânica do solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. *Biologia dos solos dos cerrados*. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1997. p.467-524.

SILVA, J. E. da.; 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, p. 357-363, 2004.

SINGH, B. R.; LAL, R. The potential of soil carbon sequestration through improves management practices in Norway. *Environmental, Development and Sustainability*, v. 7, p. 161-184, 2005.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage Research*, v. 76, p. 39-58, 2004.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M.C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. *Acta Sci. Agron*., v.31, p.709-717, 2009.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYSE, S.; DENEF, K. A history of research of the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research,* v. 79, p. 7-31, 2004.

SKENE, T. M.; SKJEMSTAD, J. O.; OADES, J. M.; CLARKE, P. J. The influence of inorganic matrices on the decompositions of straw. *Aust. J. Soil Res.*, v. 34, p. 413-426, 1996.

SKJEMSTAD, J.O.; LE FEUVRE, R.P.; PREBBIE, R.E. Turnover of soil organic matter under pasture as determined by $^{13}C$ abundance. *Aust. J. Soil Res*., v. 28, p. 267-276, 1990.

SCURLOCK, J.M.O.; HALL, D.O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biol*., v.4, p. 229-233, 1998.

SMITH, R. M.; EPSTEIN, S. Two categories of $^{13}C/^{12}C$ ratios for higher plants. *Plant Physiology*, v. 47, p. 380-384, 1971.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.; KUMAR, P.; MCCARL, B.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE,C.; SCHOLES, B.; SIROTENKO, O.; HOWDEN, M.; MCALLISTER, T.; PAN, G.; ROMANENKOV, V.; SCHNEIDER, U.; TOWPRAYOON, S.; WATTENBACH, M.; SMITH, J. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of Royal Society Biological Sciences*, v. 363, p.789-813, 2007. Disponível em: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/subscriptions>. Acesso em: Maio, 2009.

SOARES, A.M.; MELO, C.S.; VIEIRA, L.S.; DEL GROSSI, S.R. Bacia Hidrográfica do Córrego do Barbosa. *Revista da Católica*, Uberlândia, v. 1, n. 1, p. 116-122, 2009.

SOARES, A. M. CAMPOS, C.A.A.; SILVA, J.B. Avaliação ambiental e sócio-econômica no Triângulo Mineiro – MG: Subsídio ao planejamento ambiental e gestão de bacias hidrográficas. In: ENG, 2012, Belo Horizonte. *Anais*... Belo Horizonte: AGB, 2012.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, p.533- 542, 2004.

STATSOFT. *Statistica for Windows*. StatSoft, Tulsa, 1996.

TARRÉ, R. M.; MACEDO, R.; CANTARUTTI, R. B.; RESENDE, C. P.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. The effect on the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under Brachiaria pastures in the Atlantic forest region on the south of Bahia, Brazil. *Plant and Soil*, v.234, p. 15-26, 2001.

TAYLOR, S.A.; ASHCROFT, G.L. *Physical edaphology: the physics of irrigated on nonirrigated soils*. San Francisco: W.H. Freeman, 1972. 532p.

THENG, B. K. G. Soil Structure and Aggregate Stability. In: RENGASAMY, P. (Ed.). *Seminar Proceedings*. Tatura, Australia: Institute of Irrigation and Salinity Research, 1987.

THENG, B. K. G.; TATE, K. R.; SOLLINS, P. Constituents of organic matter in temperate and tropical soils. In: COLEMAN, D. C. et al. (Eds.). *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems.* Honolulu: NifTAL Project, 1989. p. 5-32.

THORNE, M. D. Moisture characteristics of some Havaiian soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 14, p.38-41, 1949.

TIESSEN, H., STEWART, J. W. B., BETTANY, J.R. Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon, nitrogen, and phosphorus in grassland soils. *Agronomy Journal*, v. 74, p. 831–835, 1982.

TILMAN, D.; CASSMAN, K. G.; MATSON, P. A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, v. 418, p. 671-677, 2002.

TISDALL, J.M. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Ed.). *Structure and organic matter storage in agricultural soils.* Lewis, Boca Raton: CRC Press, 1996. p. 57-96.

TOGNON, A. A.; DEMATTE, J. L. I.; DEMATTE, J. A. M. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil central. *Sci. agric.*, v.55, n. 3, p. 343-354, 1998.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.59, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, p.1023-1031, 2004.

UHLAND, R. E. Physlcal properties of soils as modified by crops and management. *Soil, Sci. Am. Proe*., v.14, p.361-366, 1949.

URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; ZOTARELLI, L.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Manejo de sistemas agrícolas para seqüestro de carbono no solo. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Ed.). *Processos Biológicos no Sistema Solo-Planta.* Brasília, D.F.: Embrapa, 2005. p. 323-342.

VAN DOREN, C. A.; KLINGERIEL, A. A. Permeability studies on some Illinois soils. *Soil Sci. Am. Proc*., v.14, p.51-55, 1949.

VAN VEEN, J.A.; PAUL, E.A. Organic carbon dynamics in grassland soils. I. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil. Sci.*, v.61, p. 185-201, 1981.

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.

VIEIRA, J.M., KICHEL, A.N. Estabelecimento e recuperação de pastagens de *Panicum maximum*. In: PEIXOTO, A.M., MOURA, J.C., FARIA, V.P. (Eds.). SIMPOSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM. 12., 1995, Piracicaba. *Anais*... Piracicaba: FEALQ, 1995. p. 147-196.

VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G.B.; MACEDO, M.C.M.; MARCHÃO, R.L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G.A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, p.1127-1138, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011001000003.

VOLKOFF, B. Organisations régionales de la couverture pédologique du Brésil. Chronologie des différenciations. Cah. Orstom, *sér. Pédologie*, v. XXI, p. 225-236, 1985.

WESEMAEL, B.V.; PAUSTIAN, K.; MEERSMANS, J.; GOIDTS, E.; BARANCIKOVA, G.; EASTER, M. Agricultural management explains historic changes in regional soil carbon stocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of Americ*a, v.107, n.33, p.14926–14930, 2010.

WHEETING, L. C. Changes in organic matter in western Washington soils as a result of cropping. *Soil Science,* v. 44, p. 139-149, 1937.

WILLIAMS, J. R.; ROTH, T. W.; CLAASSEN, M. M. Profitability of alternative production and tillage strategies for dryland wheat and grain sorghum in the central Great Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*. Ankeny, v. 55, p. 49-56, 2004.

ZOBY, J.L.F.; KORNELIUS, E.; SAUERESSIG, M.G. Pastagens nativas, melhoradas e cultivadas em áreas de Cerrado na recria de fêmeas de reposição. In: EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Planaltina, DF). *Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1982/1985*. Planaltina, 1987, p. 404-408.

# ANEXOS

## ANEXO 1

Referências utilizadas para elaboração do banco de dados – Item 3.4.1. Banco de Dados - Teste de Meta-análise incluindo algumas situações no Cerrado Mineiro.

| N°. Ref. | Referência | Ano (s) | Tipo de trabalho |
|---|---|---|---|
| 1 | Resende, T.M. | 2011 | Dissertação |
| 2 | Wilcke, Wolfgang; Lilienfein, Juliane. | 2000, 2003, 2004, 2005 | Artigos |
| 3 | Rosendo, J. S. | 2010 | Tese |
| 4 | Rosolen, V. et al. | 2012 | Artigo |
| 5 | Rosolen, V. | | Dados não publicados |
| 6 | Neufeldt, Henry; Resck, D.V.S.; Ayarza, M. A. | 2002 | Artigo |
| 7 | Pereira, M.G. et al. | 2010 | Artigo |
| 8 | Morais, V.A. et al. | 2013 | Artigo |
| 9 | Giácomo, Romulo G. | 2009 | Dissertação |
| 10 | Neves, Cláudia M. N. et al. | 2004, 2007 | Artigo |
| 11 | Morais, V.A. | 2012 | Dissertação |
| 12 | Passos, R.R. et al. | 2007 | Artigo |
| 13 | Roscoe, R.; Buurman, P. | 2003 | Artigo |
| 14 | Roscoe, R. et al. | 2001 | Artigo |
| 15 | Roscoe, R. et al. | 2000 | Artigo |
| 16 | Pulrolnik, K. et al. | 2009 | Artigo |
| 17 | Radam Brasil (SE.22.Goiania.v31) | 1983 | Relatório |