

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, HUMANAS E SOCIAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

Ruthcatia Bernadin

**IMPACTO DA CONVERSÃO DE FLORESTA NATIVA EM SISTEMAS**  
**AGRÍCOLAS NOS COMPARTIMENTOS DE CARBONO EM SOLOS DO**  
**ECÓTONO CERRADO-AMAZÔNIA**

**SINOP**  
**MATO GROSSO - BRASIL**  
**2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, HUMANAS E SOCIAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

Ruthcatia Bernadin

**IMPACTO DA CONVERSÃO DE FLORESTA NATIVA EM SISTEMAS**  
**AGRÍCOLAS NOS COMPARTIMENTOS DE CARBONO EM SOLOS DO**  
**ECÓTONO CERRADO-AMAZÔNIA**

Orientador: Prof. Dr. Fabiano André Petter  
Co-Orientador: Prof. Dr. Domingos de Jesus  
Rodrigues

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso, Câmpus Universitário Sinop, na área de concentração Biodiversidade e Bioprospecção, como parte das exigências para a obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais.

Linha de pesquisa: Recursos Naturais.

**SINOP**  
**MATO GROSSO - BRASIL**  
**2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

### Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

B517i Bernadin, Ruthcatia.  
Impacto da conversão de floresta nativa em sistemas agrícolas nos compartimentos de carbono em solos do Ecótono Cerrado-Amazônia / Ruthcatia Bernadin. -- 2021  
73 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Fabiano André Petter.  
Co-orientador: Domingos de Jesus de Rodrigues.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Naturais, Humanas e Sociais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Sinop, 2021.  
Inclui bibliografia.

1. Carbono. 2. Solo. 3. Manejo do solo. 4. Biomas. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**

# FOLHA DE APROVAÇÃO

02/08/2021

SEI/UFMT - 3738544 - MESTRADO - Folha de Aprovação



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "Impacto da conversão de floresta nativa em sistemas agrícolas nos compartimentos de carbono em solos do Ecótono Cerrado-Amazônia"

AUTOR (A): Mestranda Ruthcatia Bernadin

Dissertação defendida e aprovada em 27/07/2021.

## COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Doutor(a) Fabiano André Petter (Presidente Banca / Orientador)  
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
  2. Doutor(a) Onã da Silva Freddi (Examinador Interno)  
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
  3. Pós-Doutor(a) Ben Hur Marimon Junior (Examinador Externo)  
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO - UNEMAT
  4. Doutor(a) LARISSA BORGES DE LIMA (Examinador Suplente)  
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
  5. Doutor(a) Fabrício Ribeiro Andrade (Examinador Suplente)  
INSTITUIÇÃO: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFMT
- SINOP, 27/07/2021.



Documento assinado eletronicamente por **ONA DA SILVA FREDDI, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 29/07/2021, às 15:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **FABIANO ANDRE PETTER, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 30/07/2021, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ben Hur Marimon Junior, Usuário Externo**, em 02/08/2021, às 16:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufmt.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3738544** e o código CRC **FB723105**.

Referência: Processo nº 23108.059437/2021-90

SEI nº 3738544

## DEDICATÓRIA

Em homenagem aos meus pais **Dorasine Surlin e Wilson Bernadin**, por todo o carinho, atenção, dedicação, educação, por me preparar para o mundo e que, onde quer que estejam, sei que estão ao meu lado sempre, dando força e proteção. Vocês sempre estiveram e estarão presente em minha vida, pois eu carrego vocês em meu coração, alma e essência para sempre.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a **Deus**, por todas as vezes que me guiou, me protegeu, me deu inteligência, saúde, força e coragem para dar este passo em minha jornada.

Desde que cheguei em Sinop / MT, estou cada vez mais confiante de que tenho muita sorte, por sempre encontrar pessoas tão maravilhosas no meu caminho! Portanto, a palavra que mais desejo escrever após concluir essa dissertação é ***Obrigada!***

Ao meu orientador, Prof. Dr. **Fabiano André Petter**, pela orientação, pela oportunidade para realizar este trabalho, pelo apoio, pelos conselhos, por todos os ensinamentos e pela paciência durante este trabalho. ***Muito obrigada!***

Ao meu Co-orientador, Prof. Dr. **Domingos de Jesus Rodrigues**, pelo apoio na escolha das áreas de estudo, além das sugestões e assistência técnica prestada na preparação deste trabalho, e sempre me aconselhando, e obrigada pela confiança em meu desempenho.

Ao professor Dr. **Onã da Silva Freddi**, pela valiosa colaboração nas análises estatísticas. ***Obrigada!***

A professora Dr.(a). **Larissa Borges de Lima**, pelas contribuições dadas durante todo o processo do trabalho. ***Muito obrigada!***

Ao campus da Universidade Federal de Mato Grosso Sinop e aos professores do programa de pós-graduação em ciências ambientais, que muito contribuíram para a minha formação. À CAPES e OEA pelo apoio financeiro por meio da bolsa.

Ao laboratório de solos por permitir a utilização de sua estrutura para a realização do projeto de pesquisa.

Ao **Josiane de Fátima Alfonso Godoy, França e Fabio**, pela ajuda muito importante em todas as coletas de solo realizadas, sem a qual não seria possível a realização desta dissertação.

À minha família, por estar sempre ao meu lado, pelo incentivo, paciência e amor incondicional que têm por mim.

Ao **Corazon Blanc**, por sua ajuda, força e seu incentivo ao longo deste estudo.

À todos meus grandes amigos (**Wilner Pierre, Jackingson Deceus, Fabio Martins de Almeida...**) que estão sempre ao meu lado para me dar força e coragem e torceram para que este dia chegasse e colegas (**Wisnel Joseph, Aline Katiane Kurtz, Adriel Rafael Rigotti...**) de trabalho que me incentivaram e me ajudaram a vencer este desafio. Meus sinceros agradecimentos pelas palavras de coragem e ânimo que me fizeram mais forte.

Em especial a minha segunda família na casa que Deus colocou em meu caminho, que sempre fizeram parte da minha vida deste que eu cheguei em Sinop e que enfrentaram todos os desafios ao meu lado.

E a todos aqueles que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho,  
**Muito obrigada!**

## RESUMO

A conversão de florestas nativas em sistemas agrícolas é vista como o catalisador que, comprometendo a qualidade do solo, leva a um rápido declínio dos estoques de carbono do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os compartimentos de carbono em áreas de floresta nativa, agricultura e pastagem nos biomas Cerrado, na Amazônia e, na transição Cerrado-Amazônia, totalizando nove grandes áreas de estudo. Este estudo foi desenvolvido a partir de amostras de solo coletadas na Estação Ecológica do Rio Ronuro (ESEC) localizada no município de Nova Ubiratã na região central do estado do Mato Grosso, caracterizada como Latossolo Vermelho-Amarelo. Foram coletadas 216 amostras com 6 pseudo-repetições nas profundidades de 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m, em quatro pontos aleatoriamente ao longo de um traçado imaginário. Nessas amostras, foram determinados o C total, o C lábil, as frações químicas da matéria orgânica do solo, o índice de humificação, a labilidade da matéria orgânica do solo e a densidade do solo. Os resultados mostram que a remoção de áreas nativas para a introdução da agricultura reduziu os estoques de carbono do solo a uma profundidade de 1,0 m, em 30% no Cerrado, 33% no Ecótono e 43% na Amazônia, após o período de 17 a 20 anos de uso da terra em relação à vegetação nativa. Mudanças nos padrões físicos (densidade) e químicos (CTC) do solo também foram observadas, com maiores reduções (-38%) a uma profundidade de até 0,20 m na área de agricultura do Ecótono. Houve redução nas concentrações de AF por extenso nas camadas mais profundas dos Biomas e áreas agrícolas Ecótono na profundidade de 0,20 a 1,0 m. Além disso, independente do bioma, verificou-se na camada superficial de 0,0-0,05 m das áreas de vegetação nativa valores maiores de teor (2,25%) dos estoques de carbono de 12,2 Mg ha<sup>-1</sup>. Porém, as pastagens no Cerrado tendem a apresentar ganhos nos estoques de carbono ao longo dos anos, devido à produção de material orgânico com alta relação C/N das gramíneas, resultando em recuperação da qualidade da matéria orgânica do solo.

**Palavras-Chave:** Carbono, Solo, manejo do solo, Biomas

## ABSTRACT

The conversion of native forests to agricultural systems is seen as the catalyst that, by compromising soil quality, leads to a rapid decline in soil carbon stocks. This work aimed to evaluate the carbon compartments in areas of native forest, agriculture and pasture in the Cerrado and Amazonia biomes, in the Amazon-Cerrado transition, totaling nine major study areas. This study was developed from soil samples collected at the Rio Ronuro Ecological Station (ESEC) located in the central region of the state of Mato Grosso in the municipality of Nova Ubiratã, characterized as Latossolo Vermelho-Amarelo. 216 samples were collected with 6 pseudo-repeats at depths from depths of 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m, at four points randomly along an imaginary path. In these samples, total C, labile C, chemical fractions of soil organic matter, humification index, soil organic matter lability and soil density were determined. The results showed that the removal of native areas for the introduction of agriculture reduced soil carbon stocks to a depth of 1.0 m, by 30% in the Cerrado, 33% in the Ecotone and 43% in the Amazon, after the period of 17 to 20 years of land use in relation to native vegetation. Changes in soil physical patterns (density) and chemical (CTC) were also observed, with further reductions of around 38% at a depth of 0.20m in Ecotone agriculture. There was a reduction in AF concentrations in the deepest layers of Biomes and Ecotone agricultural areas at a depth of 0.20 to 1.0 m. In addition, regardless of the Biome, it was found in the 0.0-0.05 m surface layer areas of native vegetation with higher values of carbon content (2,25%) and stocks (12.2 Mg ha<sup>-1</sup>). However, pastures tend to show gains in carbon stocks, over the years due to the production of organic material with a high C/N ratio of grasses, resulting in recovery of soil organic matter quality.

**Keywords:** Carbon, Soil, Soil Management, Biomes

## SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT.....	vi
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	1
1.1. Justificativa .....	3
CAPÍTULO 1 .....	5
2. Revisão da Literatura .....	5
2.1. Carbono e matéria orgânica do solo.....	5
2.1.1. Carbono.....	5
2.1.2. Matéria orgânica do solo .....	6
2.1.2.1. Determinando fatores no estoque MOS .....	7
2.1.2.1.1. Mineralogia do solo.....	7
2.1.2.1.2. Clima .....	7
2.1.2.1.3. Temperatura .....	8
2.1.2.2. Fracionamento químico da matéria orgânica do solo.....	8
2.2. Ciclos biogeoquímicos de carbono (C) e nitrogênio (N).....	9
2.2.1. Ciclos biogeoquímicos de carbono (C) .....	9
2.2.2. Ciclo biogeoquímicos de nitrogênio.....	10
2.3. Armazenamento de carbono e influência do sistema de uso da terra na dinâmica do carbono	11
2.3.1. Armazenamento de carbono.....	11
2.3.2. Influência do sistema de uso da terra na dinâmica do carbono .....	12
2.3.3. Influência dos fertilizantes na dinâmica do carbono .....	12
2.3.4. Os gases de efeito estufa e o aquecimento global .....	13
2.4. Carbono Pirogênico.....	15
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
CAPÍTULO 2 .....	23
RESUMO	23
ABSTRACT.....	24
1 INTRODUÇÃO .....	25
2 MATERIAL E MÉTODOS .....	27
2.1 Caracterização da área de estudo .....	27
2.1.1 Localização da área .....	27
2.1.2 Características geológicas da área.....	28

2.1.3	Caracterização da vegetação das áreas de estudo.....	28
2.1.4	Coleta das amostras.....	29
2.1.5	Determinação de Carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT).....	30
2.1.6	Fração oxidável do carbono lábil.....	31
2.1.7	Determinação do fracionamento Químico de Substâncias Húmicas.....	32
2.1.8	Determinação da densidade do solo.....	34
2.1.9	Índice de manejo de carbono.....	34
2.1.10	Cálculo do índice de humificação.....	34
2.2	Análise estatística.....	35
3	RESULTADOS.....	36
3.1	Análise Hierárquica e Não-Hierárquica (k-means) dos atributos.....	36
3.2	Carbono e Nitrogênio Total.....	39
3.3	Densidade do solo.....	42
3.4	Capacidade de troca catiônica (CTC).....	42
3.5	Frações químicas da matéria orgânica do solo.....	43
3.6	Índices de manejo de carbono associado às frações químicas da matéria orgânica do solo.....	43
3.7	Estoques de carbono no sistema.....	46
4	DISCUSSÃO.....	47
4.1	Carbono e Nitrogênio Total.....	47
4.2	Densidade do solo.....	48
4.3	Capacidade de troca catiônica (CTC).....	49
4.4	Frações químicas da matéria orgânica do solo.....	50
4.5	Índices de manejo de carbono associado às frações químicas da matéria orgânica do solo.....	50
4.6	Estoques de carbono no sistema.....	51
5	CONCLUSÕES.....	53
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Médias não padronizadas de atributos para cada cluster de acordo com a análise de agrupamento k- .....	45
---	----

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização da área de estudo Nova Ubitatã no estado de Mato Grosso. ....27
- Figura 2.** Localização das áreas de pontos de coleta das amostras de solo (A). Plano de amostragem (pseudo-repetições) do solo nas áreas de floresta nativa(F), agricultura(A) e pastagem(P) nos Biomas Amazônia, Cerrado e na Transição Amazônia-Cerrado para determinar as propriedades físicas, químicas e compartimentos de carbono (B).....30
- Figura 3.** Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de clusters segundo os teores de carbono orgânico (C), nitrogênio (N), estoques de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), densidade do solo (Ds), estoque de nitrogênio total (NT), capacidade de troca catiônica (CTC), ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), humina (HU), grau de polimerização (GP), carbono lábil (CLAB), carbono não lábil (CNLAB), índice de compartimento de carbono (ICC) e índice de manejo do carbono (IMC) nos Biomas Cerrado, Amazônia e no Ecótono sob três sistemas de uso da terra: vegetação nativa, agricultura e pastagem nas profundidades de 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m. ....37
- Figura 4.** Médias padronizadas dos atributos químicos do solo sob diferentes usos da terra nos Bioma Cerrado, Amazônia e Ecótono de agrupamentos pela análise não-hierárquica k-means. Teores de carbono orgânico (C), nitrogênio (N), estoques de carbono orgânico total (COT), densidade do solo (Ds), estoque de nitrogênio total (NT), capacidade de troca catiônica (CTC), ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), humina (HU), grau de polimerização (GP), carbono lábil (CLAB), carbono não lábil (CNLAB), índice de compartimento de carbono (ICC) e índice de manejo do carbono (IMC) no Bioma Cerrado, Ecótono e Amazônia sob três sistemas de uso da terra: vegetação nativa, agricultura e pastagem nas profundidades de 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m. ....38
- Figura 5.** Análise de componentes principais dos atributos químicos do solo sob diferentes usos do solo no Bioma Cerrado, Amazônia e no Ecótono. Teores de carbono orgânico (C), nitrogênio (N), estoques de carbono orgânico total (COT), densidade do solo (Ds), estoque de nitrogênio total (NT), capacidade de troca catiônica (CTC), ácido húmico (AH), humina (HU), grau de polimerização (GP), carbono lábil (CLAB), carbono não lábil (CNLAB), índice de compartimento de carbono (ICC) e índice de manejo do carbono (IMC) no Bioma Cerrado, Ecótono e Amazônia sob três sistemas de uso da terra: vegetação nativa, agricultura e pastagem. Profundidades de 0-0,05m (A); 0,05-0,10m (B) e 0,10-0,20m (C).....40
- Figura 6.** Análise de componentes principais dos atributos químicos do solo sob diferentes usos da terra no Bioma Cerrado, Amazônia e no Ecótono. Teores de carbono orgânico (C), nitrogênio (N), estoques de carbono orgânico total (COT), densidade do solo (Ds), estoque de nitrogênio total (NT), ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), humina (HU), grau de polimerização (GP), carbono lábil (CLAB), carbono não lábil (CNLAB), índice de compartimento de carbono (ICC) e índice de manejo do carbono (IMC) no Bioma Cerrado, Ecótono e Amazônia sob três sistemas de uso da terra: vegetação nativa, agricultura e pastagem. Profundidades de 0,20-0,40m (A); 0,40-0,60m (B) e 0,60-1,00m (C).....41
- Figura 7.** Capacidade de troca catiônica (CTC) em função dos estoques de carbono orgânico total (COT) de Latossolos sob vegetação nativa, agricultura e pastagem da Amazônia, Cerrado e no Ecótono na profundidade de 0,0-0,10m. \*\* significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.....43

- Figura 8.** Estoques e aumento/redução percentual de carbono orgânico total (COT) nas profundidades de 0,0-1,0m em um Latossolo sob vegetação nativa, agricultura e pastagem na Amazônia, Cerrado e no Ecótono.....**46**
- Figura 9.** Emissão de C-CO<sub>2</sub> ao longo do perfil de 1,0m em um Latossolo sob agricultura e pastagem na Amazônia, Ecótono e Cerrado.....**47**

## Lista de siglas e Símbolos

ESEC - Estação ecológica

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização das Nações Unidas para Agricultura)

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernmental de Mudanças Climáticas)

OMI – Organização Meteorológica Internacional

% - Porcentagem

~ - Aproximadamente

ha - Hectare

Mg ha<sup>-1</sup> – Megagramos por hectárea

°C – Graus Celsius

Pg - Pentagrama

pH – Potencial hidrogeniônico

ppm – Partes por milhão

t ha<sup>-1</sup> – Toneladas por hectare

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O ciclo global de carbono (C) tem sido modificado por atividades antropogênicas, como a conversão de florestas nativas em pastagens ou áreas em cultivadas. Estas práticas são responsáveis por grande parte das emissões de dióxido de carbono na atmosfera e alterações na qualidade do ar. O solo também sofre alterações com a influência do manejo antrópico, comprometendo suas características físicas e químicas (LAL, 2008). Esta conversão tem movimentado a exploração ilegal de madeira e a queima de florestas nativas. Práticas que provocam perda da capacidade produtiva do solo, esse cenário se deve à ocorrência frequente de erosão, e declínio dos aportes orgânicos do solo, diminuindo conseqüentemente os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) estocados, culminando no aumento da emissão de gases de efeito estufa, e influenciando diretamente nas mudanças climáticas e aquecimento global (FREIXO et al., 2002).

De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), as ações antrópicas são responsáveis por um aumento da temperatura média do planeta em torno de 0,6°C desde o início do século XX. Eventos como a Revolução Industrial ocorrida no século XVIII e a adoção de práticas não conservacionistas na agricultura, são responsáveis pelo aumento da queima de combustíveis fósseis elevando significativamente a quantidade de CO<sub>2</sub> lançado na atmosfera (BUCKERIDGE e AIDAR, 2002). Entre 1990 e 2010, as emissões resultantes da atividade agrícola e industrial foram responsáveis por 12% das emissões antrópicas de carbono (FRIEDLINGSTEIN et al., 2010). Além disso, entre 2000 e 2010, as emissões de carbono devido ao desmatamento representaram 10% das emissões de carbono emitidas no intervalo anteriormente citado (ACHARD et al., 2014).

Dentre os gases de efeito estufa, o CO<sub>2</sub> é lançado na atmosfera em maior quantidade, resultando em maior concentração atmosférica, conseqüentemente causando alterações no clima do planeta. Nos últimos 250 anos, foram registrados um aumento de cerca de 100 ppm (partes por milhão) na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Dados mais recentes mostraram uma concentração de 379 ppm em 2005 (FORSTER et al., 2007), 389 ppm em 2010 (CHEN et al., 2011), 417 ppm em 2020 (NOAA, 2020), e considerando que as emissões de CO<sub>2</sub> advindas do solo são um componente importante para o ciclo global de carbono, pequenas variações nestas emissão podem causar impactos significativos na atmosfera (RETH et al., 2005).

Solo é um sistema que desempenha papel fundamental na manutenção dos estoques de carbono, apresentando grande potencial de sequestrar os gases de efeito estufa, na forma de acúmulo de substâncias orgânicas estáveis no solo. O solo é capaz de mitigar a emissão e

transferência de carbono para a atmosfera, pois, o carbono potencial formador do gás CO<sub>2</sub>, pode ficar estocado no solo na forma orgânica por um período prolongado, contribuindo para o não agravamento das mudanças climáticas. Além disso, o aumento do aporte orgânico no solo melhora significativamente a agregação, porosidade, aeração, balanço de nitrogênio, infiltração e retenção de água entre outros benefícios. É válido ressaltar que há grande variação no carbono do solo, com regiões de maior potencial de emissões na forma de CO<sub>2</sub> do que outras (LAL, 2004).

Segundo CHAPIN et al. (2011), a adição de carbono no solo se dá principalmente pela deposição da material orgânico advindo dos vegetais. No processo de decomposição uma parte do carbono é devolvido para a atmosfera e outra parte fica armazenada no solo, na forma de matéria orgânica humificada e/ou protegida fisicamente pela fração mineral do solo, e na biomassa microbiana, permitindo o estoque e o acúmulo de carbono no solo.

Cada tipo de solo possui características específicas, adquiridas devido ao seu material de origem e aos processos pedogenéticos no qual passaram (LA SCALA et al., 2000a, 2000b, BAHIA et al., 2015, LEAL et al., 2015). Processos pedogenéticos são específicos, diferindo conforme o local onde ocorrem variados processos físicos, químicos e biológicos que governam a formação e desenvolvimento das características morfológicas de cada tipo de solo.

Dependo das características adquiridas na formação do solo, e as características do ambiente, os processos de decomposição da matéria orgânica seguirão uma dinâmica diferente, tomando mais ou menos eficiente a capacidade de estocar carbono orgânico no solo (COS) (BRONICK e LAL, 2005). Logo, conhecer a dinâmica de perda ou adição de carbono em cada tipo de solo é uma ferramenta imprescindível para adotar medidas e manejos que proporcionem maior estocagem de carbono no solo e diminuam o efluxo desse componente para a atmosfera na forma de CO<sub>2</sub>.

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2009), as florestas mundiais possuem ampla importância na mitigação das mudanças climáticas, uma vez que, estes ecossistemas capturam o dióxido de carbono que poderia ser armazenado na atmosfera sob a forma de gás de efeito estufa, convertendo em biomassa vegetal. Além disso, elas desempenham um papel crucial na regularização do ciclo do carbono e da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. As florestas são os maiores reservatórios de carbono dentre os ecossistemas terrestres, contendo cerca de 80% de todo o carbono armazenado na vegetação terrestre e cerca de 40% do carbono nos solos (ROCHA, 2003).

Como o acúmulo de carbono no solo é através do aporte de matéria orgânica, é válido destacar que além da contribuição na mitigação da emissão de CO<sub>2</sub>, a matéria orgânica do solo (MOS) também é fonte de nutrientes para as plantas, possui alta CTC, e elevada capacidade de complexar elementos tóxicos. A MOS promove ainda maior estabilidade estrutural do solo por possuir propriedades cimentantes conferindo maior adesão das partículas minerais do solo. Fica claro que a manutenção dos estoques de carbono no solo na forma de MOS mantém, ou até aumenta, a capacidade produtiva do solo (SILVA e MENDONÇA, 2007).

É válido ressaltar ainda que, se a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera continuar a aumentar e a influenciar o aumento da temperatura do planeta, causará um aumento no nível dos oceanos e alterações na variabilidade dos ciclos hidrológicos, ameaçando a vida no planeta (CÂNDIDO et al., 2013). Como resultado da compreensão da gravidade do risco (do aumento do CO<sub>2</sub>) atmosférico e suas implicações para a vida das pessoas, novas estratégias internacionais estão sendo desenvolvidas para a implementação de novas práticas de gestão agrícola e florestas para aumentar a remoção do excesso de carbono atmosférico. Esse processo se dá através da produção de biomassa pela fotossíntese e sua consequente imobilização no solo através dos ciclos biogeoquímicos (EFIGENO, 2007).

Levantamos a hipótese de que as mudanças no uso da terra podem resultar em alterações significativas dos ciclos biogeoquímicos consequentemente afetando os estoques de C do solo. Nossos estudos, se pautam em demonstrar que, a conversão da vegetação nativa para pastagem e agricultura em longo prazo com os atuais sistemas de manejo proporcionam alterações no balanço de carbono no solo (*input* ou *output*), determinando para isso, o *quantum* de carbono e seus reflexos na dinâmica biogeoquímica dos compartimentos da matriz orgânica do solo.

### **1.1. Justificativa**

O carbono do solo do ponto de vista ambiental por sistema de manejo que aumentem a adição de resíduos vegetais na superfície o solo, tem um papel importante na mitigação das mudanças climáticas e na melhoria da qualidade do solo. Este trabalho de pesquisa sobre a análise de compartimentos de carbono no solo está diretamente ligado às ciências ambientais, uma vez que se trata de um dos principais elementos da matéria orgânica do solo e é parte integrante do mecanismo da vida na Terra, em associação com oxigênio, nitrogênio, fósforo e hidrogênio.

A mudança no uso da terra pela conversão de floresta nativa em agricultura e pastagem ocasiona uma redução substancial nos estoques de carbono do solo. Essa perda ocorre de forma rápida, pois o equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos de adição e decomposição da matéria

orgânica do solo é quebrado, prevalecendo as perdas de carbono na forma de CO<sub>2</sub>. É válido destacar a importância na mitigação da emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, visto que, o aumento das emissões intensifica as mudanças climáticas impactando negativamente todo o planeta.

Para acumular carbono no solo e recuperar áreas degradadas, pelo uso intensivo do solo deve-se utilizar técnicas de manejo conservacionistas como: manutenção de resíduos vegetais no solo, rotação de culturas utilizando-se plantas de cobertura, e consórcio de espécies arbóreas em pastagens, como o Sistema Integração Lavoura Pecuária e Floresta (SILPF). Ou seja, deve-se levar em conta e preferir manejos que mantenham em equilíbrio o sistema Solo-planta-atmosfera, visando o maior equilíbrio e conservação dos ciclos biogeoquímicos, afim de que o sistema fique mais sustentável do ponto de vista do balanço de carbono, aumentando os estoques e diminuindo as emissões para a atmosfera.

Diante do contexto apresentado, este estudo tem como objetivo, avaliar os compartimentos de carbono (C-total, C-lábil, frações químicas da matéria orgânica do solo, índice de humificação, labilidade da matéria orgânica do solo e densidade do solo) em áreas de floresta nativa, agricultura e pastagem nos Biomas Cerrado, na transição Cerrado-Amazônia e na Amazônia, totalizando nove grandes áreas de estudo.

Para esse fim, os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Mostrar como a conversão de vegetação nativa para agrossistemas influencia os estoques de carbono no solo;
- Avaliar a dinâmica dos compartimentos de carbono em florestas, agricultura e pastagens após ações antropogênicas;
- Avaliar a sensibilidade dos biomas Amazônia e Cerrado e a Transição quanto à conversão da vegetação nativa em função dos modelos agricultáveis atualmente utilizados.

## CAPÍTULO 1

### 2. Revisão da Literatura

#### 2.1. Carbono e matéria orgânica do solo

##### 2.1.1. Carbono

O carbono (C) é o elemento fundamental presente em todos os seres vivos e o principal constituinte da matéria orgânica do solo (MOS). Quando estocado no solo contribui positivamente para a fertilidade e ajuda a compensar as emissões de gases de efeito estufa. No planeta, são vários os ambientes que estocam carbono, sendo os principais: oceanos, formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral, ecossistemas terrestres (biota + solo) e a atmosfera (SCHLESINGER, 1997).

O Oceano é responsável pelo maior estoque de C do planeta, somando uma quantidade de 38000 Pg de C, seguido pelos depósitos geológicos (5000 Pg C). No solo, a quantidade de C estocado é a maior dentre os ecossistemas terrestres, chegando a 4 vezes a quantidade estocada na vegetação e 3,3 vezes a contida na atmosfera. No solo tem-se 1500 Pg de C orgânico e 1000 Pg de C na forma mineral (MACHADO, 2005).

O C orgânico presente no solo é resultado do balanço do que é adicionado pela vegetação e o que é perdido pela decomposição e outros processos oxidativos e físicos. Dentre este processos, podemos ressaltar os dois mais importante: 1) as perdas por lixiviação do C dissolvido para águas profundas e posteriormente para o oceano, as quais correspondem a uma quantia de 0,4 Pg de C por ano (processos físicos); 2) perdas para a atmosfera na forma de CO<sub>2</sub>, advindos de ambientes bem drenados e metano advindo de ambientes mal drenados (processos biogeoquímicos) (MACHADO, 2005).

Dentre as atividades humanas podemos citar a queima de combustíveis fósseis e a produção de cimento como os maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (GEE) somando 66% de tudo que é liberado anualmente para a atmosfera. A agricultura é responsável por 20% e a mudança no uso da terra por 14% das emissões anuais globais de GEE advindas da ação antrópica (MELLO, 2007).

Nos países de clima temperado as maiores emissões de CO<sub>2</sub> são advindas da queima de combustíveis fósseis. Em regiões tropicais, as queimadas contribuem com um montante significativo das emissões anuais. No Brasil, a queima praticada em regiões de desmatamento é responsável pela emissão de cerca de 200 milhões de toneladas de C por ano para atmosfera, uma quantidade expressiva que representa mais do que a queima de combustíveis fósseis

(SANTILLI et al., 2005). A agricultura é responsável por 15% das emissões antrópicas de CO<sub>2</sub>, e por 49% de CH<sub>4</sub> (BRUINSMA, 2003).

O preparo do solo utilizando técnicas convencionais de revolvimento são grandes responsáveis pelo aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, visto que a desestruturação do solo e o rompimento dos agregados expõe a matéria orgânica para os agentes decompositores, aumentando os níveis de oxidação e consequentemente aumentando a emissão de dióxido de carbono. Outra fonte de emissão de CO<sub>2</sub> é a oxidação do metano (CH<sub>4</sub>) em ambientes anaeróbicos. Nesse caso, a vegetação nativa, quando presente, pode atuar como dreno desse gás, porém, quando degradada, essa função de dreno é significativamente diminuída (MOISER et al., 1991; LESSARD et al., 1994; KESSAVALOU et al., 1998).

### **2.1.2. Matéria orgânica do solo**

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser definida como sendo um material em diferentes estados de decomposição a partir da atuação de macrorganismos fragmentadores e microrganismos decompositores. Trata-se de um importante depósito de carbono, nutrientes e energia. A MOS protegida pelo material mineral, dentro dos agregados do solo, pode ter alta persistência, podendo permanecer por até milhares de anos (SCHMIDT et al., 2011). A MOS é utilizada como indicador da qualidade do solo, e é o principal meio de determinação da atividade biológica, além de influenciar as características físicas e químicas do solo (ROBERT, 1996).

Os teores de MOS assim como sua dinâmica (alteração e decomposição) estão condicionados a uma série de fatores daofoclimáticos, como temperatura, aeração, pH, disponibilidade de água e nutrientes do solo, quais são diretamente influenciados pela prática de manejo adotada (PAULO et al., 2010).

A manutenção dos estoques de C no solo na forma de MOS garante melhor agregação ao solo, possibilitando boas condições de aeração, retenção de umidade e disponibilização de nutrientes como nitrogênio (N), enxofre (S) e fósforo (P) para os macro e microrganismos presentes no sistema (TISDALL e OADES, 1982; ROBERT e CHENU, 1991).

A MOS pode ser dividida em fração lábil, comumente denominada como carbono lábil e na fração humificada, que é mais estável. A fração lábil é composta por estruturas de baixo peso molecular advindas de resíduos de vegetais e animais e produtos primários derivados do processo de decomposição da MOS. Já as substâncias humificadas são compostas por macromoléculas resistentes ao ataque microbiano. Essa maior persistência no solo, se deve às

complexas ligações que essa fração faz com o material mineral, ficando protegida física e quimicamente ao ataque microbiano (BARROS, 2011).

Quando consideramos o aumento dos estoques de carbono no solo e a mitigação nas emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera devemos optar por técnicas de manejo que favoreçam o acúmulo e a permanência das frações mais estáveis da MOS, ou seja, as frações humificadas (CONCEIÇÃO, 2010). Por conta destas características a MOS desempenha um papel importante na qualidade ambiental, e dependendo da forma de uso e manejo do solo, pode ser utilizada como indicadora para o balanço de carbono no sequestro de C-CO<sub>2</sub> atmosférico nas mudanças climáticas (LUIZ, 2004).

### **2.1.2.1. Determinando fatores no estoque MOS**

#### **2.1.2.1.1. Mineralogia do solo**

A MOS é influenciada pela textura e mineralogia do solo, dependendo de uma série de fatores, como clima, tipo de vegetação e uso da terra. Assim, solos argilosos tendem a ter maiores estoques de MOS do que os arenosos, pois solos argilosos possuem maior capacidade de proteção física da matéria orgânica da ação dos microrganismos, retardando sua mineralização, e ajudando a estabilizar as substâncias orgânicas na superfície do solo (DICK et al., 2009).

Segundo BALESSENT et al. (2000), a estabilidade da MOS é mais dependente dos mecanismos de proteção física dentro dos agregados por interação com a fração mineral. Assim, o aumento da micro agregação (<250 µm de diâmetro) resulta na proteção da MOS da decomposição microbiana e na redução da difusão do oxigênio nos microporos, atuando como uma barreira física da matéria orgânica contra o acesso aos microrganismos e ao seu sistema enzimático (MENDONÇA, 2007).

#### **2.1.2.1.2. Clima**

O clima atua de forma importante na formação do solo através de um conjunto flutuante de condições atmosféricas, sobre uma matéria-prima básica, que é a rocha matriz (FANNING e FANNING, 1989). O clima influencia nos atributos do solo principalmente por meio da precipitação pluviométrica média e da temperatura, resultando na composição química e mineralógica, cor e textura, bem como na formação da matéria orgânica do solo (MARTIN NETO et al., 1998; STEVENSON, 1994).

As condições climáticas, ocupam a posição mais importantes dentre aqueles na determinação dos níveis de taxas de decomposição da matéria orgânica do solo. De fato, em

um clima úmido e frio, as condições para aumentar a matéria orgânica no solo são mais favoráveis devido à menor atividade microbiana no solo do que em um clima mais quente e seco, o qual resulta geralmente em um solo pobre em matéria orgânica por estimular a atividade microbiana, promovendo a biodegradação de compostos orgânicos (BRADY & WEIL, 2013).

Porém, na avaliação da influência do clima no solo, DALMOLIN et al. (2016) observaram um conteúdo maior do estoque de carbono em solos mais argilosos e ricos em óxidos de Fe por efeito direto do clima na estabilização da MOS com maior umidade e menor temperatura.

#### **2.1.2.1.3. Temperatura**

A temperatura é um dos principais fatores fundamentais na decomposição de resíduos no solo. Além de influenciar as propriedades químicas, também acelera a taxa de metabolismo nos seres vivos (MARIN, 2016). Por exemplo, SILVA (2009), mostrou que no Rio Ronuro do MT, devido a sua região geográfica com alta precipitação e baixas temperaturas, tem relação direta no acúmulo de quantidade de matéria orgânica no solo. Por outro lado, regiões com altas temperaturas levam a um aumento na taxa de mineralização da matéria orgânica e, conseqüentemente, a um menor teor de carbono orgânico no solo (MANTOVANI et al., 2006).

Entretanto, a temperatura não é o único fator capaz de transformar o carbono em fonte de emissões, mas também os padrões de uso do solo e incêndios florestais modificam o equilíbrio natural do clima, sendo reajustado por um aquecimento da superfície terrestre. Esta condição influencia significativamente na quantidade de carbono que o solo pode reter. Portanto, para neutralizar esses efeitos, a restauração dos ecossistemas e preservação das florestas tropicais nos permitem capturar o carbono da atmosfera, que é um dos componentes fundamentais do ciclo do carbono (NOTTINGHAM, 2020).

#### **2.1.2.2. Fracionamento químico da matéria orgânica do solo**

O fracionamento químico consiste na separação do carbono presente na matéria orgânica do solo por meio de diferenças de solubilidade em função do pH da solução extratora (ácida ou alcalina), denominada substâncias húmicas (SH), sendo caracterizada por três frações ou grupos químicos: ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (STEVENSON, 1994; GUERRA & SANTOS, 1999).

O ácido fúlvico representa a fração mais lábil da MOS. Apresenta cor amarelo-parda, possui menor peso molecular e apresenta grande quantidade de grupamentos funcionais oxigenados, com maior polaridade e solubilidade em qualquer valor do pH, e também por maior

mobilidade no solo, sendo responsável por importantes mecanismos de transporte de cátions no solo (STEVENSON, 1994; SILVA & MENDOÇA, 2007).

A fração ácido húmico é caracterizado por sua coloração escura, apresenta caráter menos polar e maior massa molecular, além de ser solúvel em meio alcalino e insolúvel em meio ácido e ser responsáveis pela maior parte da CTC de origem orgânica em camadas superficiais do solo tropical (STEVENSON, 1994). Essa fração apresenta mais C e menos O, e é relativamente mais polimerizado que a fração AF (CANELLAS & FAÇANHA, 2004).

A humina, representa a fração mais estável insolúvel em meio alcalino e ácido, e permanece ligada à maior interação da fração mineral do solo (STEVENSON, 1994; SEGNINI, 2007). Essa fração apresenta maior percentual de C relacionado ao tamanho das moléculas e ao maior grau de estabilidade (ROSSI et al., 2011; BENITES et al., 2003).

## **2.2. Ciclos biogeoquímicos de carbono (C) e nitrogênio (N)**

### **2.2.1. Ciclos biogeoquímicos de carbono (C)**

O ciclo biogeoquímico do carbono é o processo responsável por garantir a reciclagem do carbono em outro compartimento e, após certo tempo, trazê-lo de volta ao compartimento original (PACHECO e HELENE, 1990).

Ao longo da história, a interação entre a terra e a biosfera causou profundas mudanças. Impacto das mudanças de uso da terra e o uso crescente de combustíveis fósseis promovidos pelo homem alteraram significativamente o ciclo do carbono. Essas mudanças resultam no incremento do CO<sub>2</sub> na atmosfera, contribuindo para o aumento de gases de efeito estufa e causando o aquecimento global (GRACE, 2001).

Existem vários compartimentos de carbono na terra. Os principais são os oceanos, a atmosfera, as formações geológicas contendo fóssil e minerais e, os ecossistemas terrestres (biota + solo). Desses, o carbono dissolvido nos oceanos é considerado com o maior compartimento, em 38.000 PgC. Contudo, o carbono em formações geológicas representa o maior reservatório que contém aproximadamente 40.000PgC (PEDRO, 2005).

A vegetação, mesmo quando constitui um importante reservatório de carbono, é parte de um dos principais fatores responsáveis pelos fluxos mais intensos no ciclo global do carbono. Portanto, estima-se que a produção primária sequestra aproximadamente 120 PgC por ano na forma de CO<sub>2</sub> atmosférico por meio da fotossíntese, e 60 PgC são devolvidos à atmosfera através da respiração dos tecidos vivos e da decomposição da MOS (SCHLESINGER, 1997).

O estoque de carbono de um solo com vegetação nativa representa o equilíbrio dinâmico entre a adição de resíduo morto e a perda pela taxa de mineralização. Esses estoques dependem da qualidade e da taxa de aporte de resíduos orgânicos pelo clima, da fertilidade do solo e dos fatores como textura e mineralogia do solo (JENNY, 1994).

### **2.2.2. Ciclo biogeoquímicos de nitrogênio**

O ciclo biogeoquímico de nitrogênio representa a sucessão de modificações pelas diferentes formas de nitrogênio (dinitrogênio, nitrato, nitrito, e amônia). Na atmosfera, ocupa cerca 78% de sua composição e é altamente estável, possuindo tempo de residência de 110 a 150 anos (SCHLESINGER, 1997). O nitrogênio, apesar dessa abundância na atmosfera, tem de duas importâncias na classe de moléculas orgânicas, sendo necessário na constituição de proteínas e do DNA que contém as informações genéticas (CHAPIN et al., 2002). O maior reservatório de N presente no solo é de origem natural, por meio de um processo conhecido como fixação biológica de nitrogênio, a qual representa aproximadamente o 95% do total de N fixado ao solo e à biota em ecossistemas terrestres. Para ser aproveitado pelos organismos, além do nitrogênio orgânico, é necessário também formas inorgânicas minerais de N sob as condições de oxidação/aeração, pois a partir da oxidação de amônia ( $\text{NH}_3^+$ ), amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), é formado o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), forma mais assimilável de N pelas plantas (COSTA et al., 2009).

O processo que resulta na transformação do  $\text{N}_2$  da atmosfera pode ser realizada de diferentes formas, denominando-se fixação de nitrogênio. Primeiro o  $\text{NH}_4^+$  é oxidado a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) através de nitrificação por bactérias (Nitrossomonas), e depois o nitrito é oxidado a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) também por ação de bactérias (Nitrobacter). O último passo no ciclo do nitrogênio é conhecido como desnitrificação, caracterizada como a redução do nitrato  $\text{NO}_3^-$  para a formação de  $\text{N}_2$  por meio de um processo químico e biológico em ambientes anaeróbicos através da ação de bactérias (Pseudomonas e Clostridium). O nitrato é considerado receptor final de elétrons não adsorvidos pelas partículas do solo, devido à falta do  $\text{O}_2$ , e à maior mobilidade na solução no solo, incluindo perda por lixiviação. É dessa forma que parte dos nitratos do solo é retornada na atmosfera em forma de  $\text{N}_2$  ((SPRENT, 1987; MOREIRA & SIQUEIRA, 2002).

## **2.3. Armazenamento de carbono e influência do sistema de uso da terra na dinâmica do carbono**

### **2.3.1. Armazenamento de carbono**

O solo é o maior reservatório de carbono em ecossistemas terrestres, além de ser um recurso natural essencial para a sobrevivência dos seres vivos, exercendo um papel fundamental no processo de sequestro de carbono da atmosfera (BERNOUX et al., 2005). Entretanto, os sistemas cultivados, dependendo das práticas de manejo e do regime climático, podem atuar como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub> atmosférico, em interação com os mecanismos e processos intrínsecos do solo (GUO & GILLFORD, 2002; LAL, 2009)

No geral, a acumulação de carbono é medida pela quantidade total de carbono armazenado no solo, sendo dependente do clima, do tipo vegetação, da quantidade e qualidade da matéria orgânica e da mineralogia do solo (TRISTRAM & SIX, 2007).

Portanto, o carbono armazenado no solo tem um período de tempo limitado até atingir o ponto de saturação no solo, isso é dependente da quantidade e qualidade da matéria orgânica que entra no solo e da quantidade de argila ou partículas minerais presentes no solo (DIMASSI et al., 2013).

De fato, a MOS é um complexo dinâmico que desempenha um papel importante no armazenamento de carbono no solo. AMOS se origina basicamente da produtividade primária dos ecossistemas, a produção de resíduos (serapilheira) e sua decomposição, e envolvendo os componentes microbianos e bioquímicos que mudam no tempo e espaço. Como resultando, ocorre um aumento na disponibilidade de água no solo, por sua vez melhorando a estrutura e especialmente a atividade microbiana e dinâmica do ciclo de nutrientes (BAMBRICK et al., 2010).

A biomassa microbiana do solo é um reservatório de nutrientes de ciclo rápido, reconhecido como um elemento-chave na decomposição e estabilidade da matéria orgânica do solo (MOS). No entanto, devido ao estresse abiótico no uso do solo, esses fatores podem mudar rapidamente e também interferir significativamente em outros componentes do armazenamento de carbono (MENDONÇA et al., 2005). Porém, a transformação do carbono do solo tem seu destino inicial neste reservatório, devido à rápida resposta dos microrganismos por práticas de manejo. Desta forma, o histórico de manejo e uso da terra pode ser usado como um identificador anterior de mudanças na MOS e na qualidade do solo (POWLSON et al., 1987).

### **2.3.2. Influência do sistema de uso da terra na dinâmica do carbono**

Os solos são um recurso fundamental para a vida no planeta, e um componente importante no ciclo do carbono, principalmente através dos fatores que controlam a fração orgânica do solo (BERNOUX et al., 2002). Portanto, mudanças no uso e na ocupação do solo pelas ações antrópicas, alterando a vegetação e perturbando a ordem físico-química do solo, provocam a redução de estoques dos estoques carbono no solo (CARVALHO et al., 2010).

Portanto, a substituição de floresta nativa por sistemas agrícolas causam maior impacto nos atributos do solo quando o manejo é feito de forma inadequada, podendo levar à perdas diretas de carbono devido ao aumento da atividade microbiana em virtude de práticas equivocadas, como a preparação excessiva do solo (LAGO et al., 2012).

Além disso, a perturbação do solo resulta na diminuição da quantidade e qualidade da MOS, reduzindo a capacidade de infiltração de água no solo, o que causa uma elevação da temperatura do solo, aumento da oxidação da matéria orgânica e conseqüentemente aumento das emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera, especialmente na forma de C-CO<sub>2</sub> (BABUJIA et al., 2010, SÁ et al., 2013).

Para enriquecer os solos de carbono, devem ser incentivadas práticas que aumentam o estoque de matéria orgânica, bem como devem ser limita aquelas que aumentam as perdas. Desta forma, práticas como o plantio direto, considerado uma forma importante de manejo do solo, é são as mais conservacionistas, por interferirem pouco na estrutura do solo, e contribuir para manter a MOS, do resultando no aumento os estoques totais de carbono no solo (MEERSMANS et al., 2012; VEZZANI et al., 2008).

O sistema de manejo tradicional acarretado modificações nas propriedades de solos bem como no comportamento, na estrutura e na qualidade da matéria orgânica (HAMZA & ANDERSON, 2005). De fato, em decorrência da quantidade impacto desse sistema de manejo, sistemas conservacionista como integração lavoura-pecuária-floresta e sistema plantio direto com uso da rotação de culturas, presença de plantas de cobertura e ausência do revolvimento do solo têm sido proposto com intuito de manter e aumentar os estoques de carbono solo, garantem aumento de MOS, e diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> (HANSEL et al., 2013; CASTELÕES, 2018).

### **2.3.3. Influência dos fertilizantes na dinâmica do carbono**

Os fertilizantes são responsáveis por diversas matérias-primas naturais que têm efeitos positivos na qualidade do solo (HAROLD, 2016). O uso adequado de fertilizantes nitrogenados

aumenta a fertilidade, apresenta maior contribuição no crescimento e no sistema radicular das plantas, bem como ao aporte de nitrogênio pelo solo. Promove ainda maior agregação de partículas do solo e contribui para o aumento da MOS e permite maior sequestro do solo carbono no solo (CAMARGO, 2012).

Segundo SHI (2009), o aumento da matéria orgânica por fertilizantes nitrogenados foi associado com a melhoria da estabilidade de agregados do solo, densidade aparente e resistência à penetração reduzidas do solo.

PRIMAVESI et al. (2006), mencionam que o carbono é o maior constituinte da matéria orgânica do solo, e apresenta relação estável com o N. Então, a partir dessa relação, a perda de Nitrogênio no solo está diretamente relacionada com as perdas de carbono com emissão de mais CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Segundo BODDY et al. (2008), para um aumento significativo de carbono do solo será necessário garantir o incremento de Nitrogênio no sistema-planta através de um sistema de manejo que diminua sua perda por degradação da MOS. Neste caso, o melhor manejo do solo para ajudar a reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera é o sistema de plantio direto (SPD), que não envolve revolvimento mecânico do solo, associado ao uso adequado de fertilizantes nitrogenados e a fixação biológica do nitrogênio na rotação de cultura (ALVES, 2010). Com tais práticas de manejo, fica assegurado o aumento do conteúdo da MOS e o aumento da fixação de carbono no solo.

Por outro lado, estudos mostram complicações devido ao uso excessivo de fertilizantes nitrogenados, que podem resultar aumento da mineralização do carbono na MOS e sua consequente liberação para a atmosfera na forma de CO<sub>2</sub> (CHANTIGNY et al., 2001).

O uso inadequado de fertilizantes nitrogenados também podem causar danos ambientais, como contaminação do solo e poluição das águas superficiais e subterrâneas, e também o aumento na emissão de óxido nitroso para a atmosfera, um importante de gases de efeito estufa (FREIRE, 2016). Além disso, o uso inadequado de fertilização com N pode comprometer a biomassa microbiana do solo e sua atividade, e causando redução no carbono orgânico no solo e consequente baixa de fertilidade (KOTSHI, 2013).

#### **2.3.4. Os gases de efeito estufa e o aquecimento global**

O efeito estufa e o aquecimento global são dois fenômenos ambientais que tem sido um assunto importante na atualidade em todo o planeta. O aquecimento global é o resultado do acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), vapor água (H<sub>2</sub>O), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), Clorofluorcarbono (CFC) e Ozônio (O<sub>3</sub>) (BAIRD,

2002; LE TREUT et al., 2007). Esses gases absorvem uma determinada quantidade radiação na faixa do comprimento de onda do infravermelho emitido pela superfície da terra, reemitindo outra parte de volta para o espaço (BARRY E CHORLEY, 2013).

Dentro os gases citados anteriormente; o dióxido de carbono, oxido nitroso, ozônio e metano, são os presentes na atmosfera e contribuem fortemente para o aquecimento global, pois são muito acessível na absorção da radiação infravermelho (ADAMS, 2008). Dentre todos, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), é o principal gás de efeito estufa. A principal fonte de CO<sub>2</sub> é o uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão, e gás natural), produção de cimento, mudanças no uso da terra (e.g. desmatamento) e sistemas inadequados de manejo do solo, como aração profunda (FREITAS & BONZANINI, 2017). Medidas com amostras de ar aprisionado no interior de blocos de gelo na Antártida e na Groelândia indicam que as concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> em épocas pré-industriais (antes de 1750) eram de aproximadamente 280 ppm, tendo aumentado para 379 ppm em 2005 (IPCC, 2007), 400 ppm em 2015, 407,9 ppm em 2018 e, 410,5 ppm em 2019 (OMI, 2020).

O metano (CH<sub>4</sub>) é o segundo maior gás responsável pelo aquecimento global. Esta gás é emitido a partir de processos de extração dos combustíveis, da degradação de substâncias orgânicas em ambientes estritamente anaeróbicos, mas em grande parte, pela atividade agropecuária, pois os ruminantes como gado, liberam metano por meio da produção de flatulência e eructação (HOUGHTON et al., 2001). Nos últimos três séculos, a concentração atmosférica de metano aumentou em comparação com a quantidade anterior à revolução industrial. Nesse período, sua concentração ficou em torno de 716 ppb, mas aumentou desde então atingindo 1775 ppb em 2005 (BAIRD, 2002; IPCC, 2007; DALAL e ALLEN, 2008), e 1877 ppb em 2019 (OMI, 2020).

O óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) é outro importante gás de efeito estufa além de participar diretamente na destruição da camada de ozônio na estratosfera. A atmosfera concentra aproximadamente 0,35 ppm de N<sub>2</sub>O com aumento anual de 0,25%. Segunda LIMA (2002), as emissões de N<sub>2</sub>O a partir dos solos ocorrem como consequência do processo microbiológico de desnitrificação do nitrogênio mineral e também do uso de fertilizantes nitrogenados, da fixação biológica de nitrogênio, da mineralização da matéria orgânica adicionada, da adição ou depósito de dejetos de animais nos solos, da lixiviação de solos e da queima de resíduos agrícolas. As concentrações do N<sub>2</sub>O aumentaram na atmosfera em 123 % acima dos níveis de pré-industriais, atingindo 332 ppm em 2019 (OMI, 2020).

## 2.4. Carbono Pirogênico

O carbono pirogênico (CPy) vem de um processo chamado pirólise, através da queima biomassa na ausência ou baixa concentração de oxigênio. A partir deste processo, é obtido um material carbonizado rico em carbono (C) e composto por estruturas aromáticas e poliaromáticas de carbono (SOMBROEK et al., 2003). Na biomassa original, o material gerado por pirólise, contém aproximadamente 50% de C, enquanto na combustão em presença de Ar-O<sub>2</sub>, o material gera somente cerca de 2 a 3% (MANGRICH et al., 2011).

Devido aos incêndios naturais ou intencionais, encontramos naturalmente o CPy no solo na forma de carvão vegetal, devido à combustão parcial da vegetação. Em média, o CPy representa 1 a 6% do conteúdo orgânico de C no solo, em locais onde há histórico de incêndios mais frequentes, os valores do CPy são muito mais altos (GONZÁLEZ-PÉREZ et al. 2004).

Segundo CASSELMAN (2007), o carvão apresenta uma estrutura interna inerte, que não se degrada rapidamente, podendo manter o carbono no solo, por muitos anos, e em sua estrutura periférica é reativa para atuar com a matéria orgânica e na estrutura o solo.

Portanto, o carvão vegetal apresenta muitas vantagens, incluindo a melhora da qualidade do solo, aumento da produtividade agrícola através da sua capacidade de reter nutrientes e umidade. Este processo nutricional relacionado ao carvão é fortemente influenciado pela estrutura policíclica aromática, a qual garante estabilidade e atividade química na sua superfície, promovendo também a absorção de compostos orgânicos solúveis (BENITES et al., 2005; NOVOTNY et al., 2006). Por esse motivo, o carvão tem grande importância para os solos tropicais, normalmente muito intemperizados e de baixa fertilidade, por possuir alta estabilidade e reatividade nesta condição climáticas. Além de melhorar as propriedades químicas e físicas e proporcionar retenção de nutrientes, o carvão aumenta a capacidade de agregação das partículas e da capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (KÄMPF et al., 2003).

## 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARD, F. et al. Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. **Global change biology**, v. 20, n.8, p.2540-2554, 2014.

ADAMS D., 2008, Greenhouse Gas Emission Factors for Coal, IEA Clean Coal Centre.

BABUJIA, L. C. HUNGRIA, M. FRANCHINI, J.C. BROOKES, P.C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology & Biochemistry**, [S.l.], v. 42, n. 12, p. 2174–2181, 2010.

- BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B.; LA SCALA, N. Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO<sub>2</sub> emission in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n. 2, p. 157-166, 2015.
- BAIRD, C. **Química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. p.622.
- BALESDENT, J.; CHENU, C., BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 215-230, 2000.
- BAMBRICK A.D., WHALEN J.K., BRADLEY R.L., COGLIASTRO A., GORDON A.M., OLIVIER A., THEVATHASAN N.V., 2010. Spatial heterogeneity of soil organic carbon in tree-based intercropping systems in Quebec and Ontario, Canada. **Agroforestry Systems** 79, 343-353.
- BARROS, J. D. de S. Estoques de carbono em solos dos Tabuleiros Costeiros Paraibanos: diferenças entre ambientes. 2011. 106 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2011.
- BARRY, R; CHORLEY, R. **Atmosfera, tempo e clima**. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro: Embrapa, 2003. 7p.
- BERNOUX. M, FELLER C, ESCHENBRENNER .V, Cerri C.C, Cerri CEP (2005) **Soil carbon sequestration**. In: Roose EJ, Lal R, Feller C, et al. (eds) Soil Eros. Carbon Dyn. CRC Press, 29-42p.
- BERNOUX. M., CARVALHO M.C.S., VOLKOFF B., Cerri C.C., 2002 - Brazil's soil carbon stocks. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 66, pp. 888-896.
- BRADY, N.C; WEIL, R.R. Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos. 3ª ed. Tradução técnica: Igo Fernando Lepsch. Editora Bookman, Porto Alegre, RS, 2013. 685p.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, 124:3- 22, 2005.
- BRUINSMA, J. (Ed). **World Agriculture: Toward 2015/30. An FAO Perspective**. London: Earthscan, Rome: FAO, 2003. 444p. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/005/Y4252E/y4252e06.htm> Acesso em: 21 de janeiro 2020.
- BUCKERIDGE, M.S., AIDAR, M.P.M. **Carbon sequestration in the rain forest: alternatives using environmentally friendly biotechnology**. Biota neotropica, Campinas, V.2, n.1, p.1-4, 2002.
- CANELLAS, L.P; FAÇANHA, A.R. Chemical nature of soil humified fractions and their bioactivity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.233-240, 2004.
- CARVALHO, J. L. N., AVANZI, J.C., SILVA, M.L.N., MELLO, C.R., CERRI, C.E.P., Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.277-289, 2010.

CASSELMAN, A. Special Report: Inspired by Ancient Amazonians, a Plan to Convert Trash into Environmental Treasure. **Scientific American, New York**, v. 67, p. 2, 2007.

CASTELÕES, L. Plantio direto com rotação de culturas é eficaz na mitigação de gases de efeito estufa. EMBRAPA, **Mudanças Climáticas**, 2018.

CHANTIGNY, M.H.; ROCHETTE, P.; ANGERS, A. Short-term C and N dynamics in a soil amended with pig slurry and barley straw: a field experiment. **Canadian Journal of Soil Science**, v.81, p.131- 137, 2001.

CHAPIN F. S.; MOONEY, H. A.; CHAPIN, M C.; MATSON, P. Principles of terrestrial ecosystem ecology. **Springer**. 2002.

CHAPIN III, F.S.; MATSON, P.A.; VITOUSEK, P. Principles of terrestrial ecosystem ecology. **Springer Science & Business Media**, 2011.

CHEN, I. C.; HILL, J. K.; OHLEMÜLLER, R.; ROY, D. B.; THOMAS, C. D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 1024-1026, 2011.

CONCEIÇÃO, A.M.S.B. Estoque de carbono e qualidade do solo em cambissolo do semiárido Baiano. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Dissertação (Mestrado), p. 59, 2010.

COSTA, A. R.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; MACHADO, P. L. O. A. BERNARDES, T. G.; SILVEIRA, P. M. Uso do nitrogênio na agricultura e suas implicações na emissão do gás de efeito estufa óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, v. 249, 47 p. 2009.

DALAL, R. C.; ALLEN, D. E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v. 56, p. 369-407, 2008.

DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. IX - Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. F. e ALLEONI, L. R. F. Química e mineralogia do solo: Parte II – Aplicações. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – SBCS**, v. 2, 685 p., 2009.

DIMASSI B., COHAN J.P., LABREUCHE J., MARY B., 2013. Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 169, 12–20.

EFIGÊNIO, F. J. DO Ó. (2007). Efeito de coberturas de solo em olival. Universidade do Algarve -Instituto Politécnico de Beja. Beja. Portugal. 44p.

FANNING, D.S.; FANNING, M.C.B. Soil: morphology, genesis and classification. John Wiley e Sons, 395 p., 1989.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO) (2009). «Review of evidence on drylands pastoral systems and climate change. Implications and opportunities for mitigation and adaptation». <http://www.fao.org/docrep/fao/012/i1135e/i1135e00.pdf>

FORSTER, P., RAMASWANY, V., ARTAXO, P., BERNTSEN, T., BETTS, R., FAHEY, D.W., HAYWOOD,J., LEAN, J., LOWE,D.C., MYHRE,G., NGANGA, J., PRINN,R., RAGA,G. SCHULZ,M., VAN DORLAND, R. **Radiative forcing of climate change , in climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth Assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge. University press, 2007.p.129-234.**

FREIRE, D. Ciencia pode ajudar a reduzir impacto de fertilizantes nitrogenados no meio ambiente. A gencia FAPESP, 2016.

FREITAS, J. C. F. de.; BONZANINI, T. K. O terma efeito estufa na educação básica: investigando como livros e materiais didáticos abordam o assunto. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapeyininga.v.4, n.2, 2017.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. Update on CO<sub>2</sub> emissions. **Nature Géoscience**, v.3, n.12, p.811-812, 2010.

GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A., GONZALEZ-VILA, F. J., ALMENDROS, G., & KNICKER, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter: a review. **Environment International**, 30(6), 855-870. PMID:15120204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>

GRACE, J. et al. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **Journal of Biogeography**, v.33, n.3, p 387–400, mar. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01448>.

GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A. Métodos Químicos e Físicos. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: **Gênese**, 1999. p.267-292.

GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. **Global Change Biology**, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002.

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

HANSEL, D. F.; AMADO, C. J. T.; KELLER, C.; BORTOLOTTTO, P. R.; NICOLOSO, DA S. R.; NORA, D. D. Emissões de dióxido de carbono em sistema plantio direto de longa duração. **Congresso Brasileiro de ciência do solo**, 2013.

HAROLD, F. R. J. Fertilizantes e seu uso eficiente. 2016, 178p.

HOUGHTON, J.T., Y. DING, D.G. GRIGGS, M. NOGUER, R.J. VAN der LINDEN & D. XIAUSU (eds.). 2001. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 944 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Mitigation of Climate Change**: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate Change 2007: **The Physical Science Basis**. In: SOLOMOM, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p.996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate change 2007: **Climate change impacts, adaptation and vulnerability**. Working Group II. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.

JENNY, H. Factors of soil formation. **A system of quantitative pedology**. Dover, 281.p. 1994. (Reimpresso do original de 1941).

- KÄMPF, N.; WOODS, W. I.; SOMBROEK, W.; KERN, D. C.; CUNHA, T. J. F. Classification of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: LEHMANN, J. et al. (Eds.). **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**. Dordrecht: Kluwer, 2003. p.77-102.
- KESSAVALOU, A.; MOISER, A.R.; DORAN, J.W.; DRIJBER, R.A.; DREW, J. L.; HEINEMEYER, O. Fluxes of Carbon dioxide, nitrous oxide, and methane in Grass sod and winter wheat-fallow tillage management. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.27, p.1094-1104, 1998.
- LA SCALA JR, N.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p.1459-1462, 2000b.
- LA SCALA JR, N.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p.1469-1473, 2000a.
- LAGO, W.N.M.; LACERDA, M.P.C.; NEUMANN, M.R.B. Indicadores de qualidade dos solos na microbacia do Ribeirão Extrema, Distrito Federal: Parte II. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16:721–729, 2012.
- LAL, R. *Agronomy for Sustainable Development*. V.28, p.57-64, 2008.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science, Washington**, v. 304, n. 5.677, p. 1.623–1.627, 2004.
- LE TREUT, H.; SOMERVILLE, R.; CUBASCH, U.; DING, Y.; MAURITZEN, C.; MOKSSIT, A.; PETERSON, T.; PRATHER, M. Historical overview of climate change. In: SOLOMONS, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.). **Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p.93-127.
- LEAL, F. T.; FRANÇA, A. B. C.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B.; LA SCALA JR, N. Characterization of potential CO<sub>2</sub> emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agrícola, Piracicaba**, v. 72, p.535-539, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0420>.
- LESSARD, R., ROCHETTE, P., TOPP, E., PATTEY, E., DESJARDINS, R.L., BEAMONT, G. Methane and Carbon dioxide fluxes from poorly drained adjacent cultivated and forest sites. **Canadian Journal Science, Ottawa**, v.74, n.2, p.139-146, 1994.
- LIMA, M. A. Agropecuária brasileira e as mudanças climáticas globais: caracterização do problema, oportunidades e desafios. **Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília**, v.19, n. 3, p.451-472, dez. 2002.
- LUIZ, F. C. L., *Matéria Orgânica do Solo*. Teresina: Embrapa Meio-Norte. 2004. " 31p.: 21 cm - **Embrapa Meio-Norte**. Documentos: 971.
- MACHADO, P. L. O. D.A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova** v. 28, p. 329-334, 2005.
- MANGRICH, A. S.; MAIA, C. B. F.; NOVOTNY, E. H. Biocavão, as terras pretas de índios e o sequestro de carbon. **Ciência Hoje**, Sao Paulo, v.47, p.48-52, 2011.

- MARIN, F. Temperatura do ar e do solo. Universidade De São Paulo, Escola superior de Agricultura Luiz de Queiroz, departamento de Engenharia de Biosistemas LEB5036 Micrometeorologia de sistemas agrícolas, 2º semestre. 2016.
- MARTIN NETO, L.; ROSELL, R.; SPOSITO, G. Correlation of spectroscopy indicators of humification with mean annual rainfall along a temperate grassland climosequence. **Geoderma**, v. 81, p. 305-311, 1998.
- MEERSMANS J. et al. 2012. A high-resolution map of French soil organic carbon. **Agronomy for Sustainable Development**, 32(4), 841-851.
- MELLO, F.F.C; Estimativas dos Estoques de Carbono dos Solos nos Estados de Rondônia e Mato Grosso anteriores à intervenção antrópica. 2007. 89p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “ Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- MENDONÇA, B. A. F. Fertilidade do solo e nutrientes de plantas: Gênese, Morfologia e classificação, mineralogia, química. Universidade Federal de Viçosa, 2007.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. Matéria orgânica do solo: métodos de análises. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, UFV, 2005. 107p.
- MOISER, A.; SCHIMEL, D.; VALENTINE, D.; BRONSON, K. PARTON, W. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. **Nature, London**, v. 350, n. 28, p. 330-332, 1991.
- MONTOVANI, J. R.; FERREIRA, M. E.; PESSOA DA CRUZ, M. C.; BARBOSA, J. C.; FREIRIA, A. C. Mineralização de carbono e de nitrogênio provenientes de composto de lixo urbano em argissolo. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas**. v.30, n.4, p677-684, 2006.
- MOREIRA, F. M. S.Ç SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras UFLA, 2002. 625p.
- NETO, C. F. de O.; BARBOSA, R. R. do N.; SILVA, A. de A.; NEVES, M. G.; GALVÃO, A. R. de A. Produção e sequestro de carbono na atmosfera. Enciclopédia biosfera, **Centro Científico Conhecer - Goiânia**, v.9, n.16; p. 17-83.2013.
- NOTTINGHAM, A.T., Meir, P., Velasquez, E. et al. Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest. **Nature** 584, 234–237 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2566-4>
- NOVOTNY, E.H.; HAYES, M.H.; DEAZEVEDO, E.R.; BONAGAMBA, T.J. Characterisation of black carbon-rich samples by (13) C solid-state nuclear magnetic resonance. **Naturwissenschaften**. v.93(9) p.447 - 50, 2006.
- ORGANIZAÇÃO METEOROLOGICA INTERNACIONAL (OMI). Boletim de Gases de efeito estufa 2020.
- PACHECO, M. R. P. S. e HELENE, M. E. M. Transcrições e notas: Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO<sub>2</sub>. **Estudos Avançados**, v.4, n.9, p. 204–220, 1990.
- PAULO, C. N., JOÃO, L. L., EDUARD, S. M., HUGO, J. O. Z., HENRIQUE, T. M. P., 2010. TEORES E CARACTERÍSTICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE SOLOS HIDROMÓRFICOS DO ESPÍRITO SANTO. **Ciência Solo**, [Brasília], v.34, p.339-348.

- PEDRO, L. D. A. (2005). Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Quim. Nova**, 28(2), 329-334.
- POWLSON, D. S.; BROOKES, P. C.; CHRISTENSEN, B. T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in the total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology Biochemic**, v.19, p.159-164, 1987.
- PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L. de A.; CANTARELLA, H.; PRIMAVESI, A. C.; SILVA, A. G. da. Nutrientes na fitomassa de capim-marandu em função de fontes e doses de nitrogênio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 3, p. 562-568, 2006.
- RETH, S., MARKUS, R., FALGE, E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH value and the root mass on soil CO<sub>2</sub> efflux-A modified model. **Plant and soil, Dordrecht**, V.268, n.1-2, p.21-33, 2005.
- ROBERT, M. 1996. **Environmental Impacts**. p. 227–242 Vol. 2, Soil component interactions. CRC press.
- ROBERT, M., CHENU, C. 1991. Interactions between soil minerals and microorganisms. p 307–393 in: **Soil Biochemistry** 7. Bollag, J.M., Stotzky, G. (eds.). Marcel Dekker, New York.
- ROCHA, M.T.: Aquecimento Global e o Mercado de Carbono: uma aplicação do Modelo CERT. Tese. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Área de Concentração. Economia Aplicada. Piracicaba, 2003. 196 p.
- ROSSI, C.Q.; PEREIRA, M. G.; GIACOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J.C. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia**. Campinas, v.70, n.3, p.622-630, 2011.
- SÁ, J. C. M., SEGUY, L., TIVET, F. LAL, R., BOUZINAC, S., BORSZOWSKI, P.R., BRIEDIS, C., SANTOS, J.B., HARTMAN, C.D., BERTOLONI, G.C., ROSA, J., FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of sub-tropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation and Development**, 2013.
- SANTILLI, M.; MOUTINHO, P.; SCHWARTZMAN, S.; NEPSTAD, D.; CURRAN, L.; NOBRE, C.: Tropical deforestation and the kyoto protocol. **Climatic Change, Essay**, v.71, p.267-276, 2005.
- SCHLESINGER, W. H. **Biogeochemistry**: an analysis of global change. 2nd. ed. Academic Press, 588 p., 1997.
- SCHMIDT, M. W. I., TORN, M. S., ABIVEN, S., DITTMAR, T., GUGGENBERGER, G., JANSSENS, I. A., KLEBER, M., KÖGEL-KNABNER, I., LEHMANN, J., MANNING, D. A. C., NANNIPIERI, P., RASSE, D. P., WEINER, S. & E. TRUMBORE, S. E. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, 478: 49–56.
- SEGANFREDO, M. A. Os dejetos de suínos são um fertilizante ou um poluente do solo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, [Brasília], v.16, n.3, p. 129-141, 1999.
- SEGNINI, A. Estrutura e estabilidade da matéria orgânica em áreas com potencial de seqüestro de carbono no solo. 2007. 131f. Tese (Doutorado em Ciências – Química Analítica). Universidade de São Paulo: Instituto de Química, São Carlos.

SHI, Z. H.; CHEN, L. D.; CAI, C. F.; LI, Z. X.; LIU, G. H.; Effects of long-term fertilization and mulch on soil fertility in contour hedgerow systems: A case study on steepplands from the Three Gorges Area, China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 84, p. 39–48, 2009.

SOMBROEK, W.; RUIVO, M.L.; FEARNESIDE, P.M.; GLASER, B.; LEHMANN, J. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. Kluwer Academic Publishers, **Dordrecht**, p.125-139, 2003

STEVENSON, F.J. 1994. **Humus chemistry**: genesis, composition, reactions. New York: John Wiley, 1994. 496p.2nd ed.

TISDALL, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates. *J. Soil Sci.* 33: 141–163.

TRISTRAM, O.; SIX, J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. **Climatic Change**, v. 80, p. 25-41, 2007.

VEZZANI, F.M.; CONCEIÇÃO, P.C.; MELLO, N.A.; DIECKOW, J. Matéria orgânica e qualidade do solo. 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, 483-493, 2008.

## CAPÍTULO 2

### IMPACTO DA CONVERSÃO DE FLORESTA NATIVA EM SISTEMAS AGRÍCOLAS NOS COMPARTIMENTOS DE CARBONO EM SOLOS DO ECÓTONO CERRADO-AMAZÔNIA

#### RESUMO

As mudanças no uso e exploração desordenado da terra o manejo inadequado de pastagens e lavouras vem causando alterações na qualidade do solo, influenciando a sua temperatura e teor de umidade, ocasionando acelerações como a oxidação da matéria orgânica, como resultado, ocorrem perdas significativa dos estoques de carbono no solo na forma de emissões de CO<sub>2</sub>. Dessa forma, o presente estudo teve por objetivo avaliar os compartimentos de carbono (C-total, C-lábil, frações químicas e físicas da matéria orgânica do solo, índice de reatividade, humificação e labilidade da matéria orgânica do solo, densidade do solo) em áreas de floresta nativa, agricultura e pastagem nos biomas Cerrado, Amazônia e no Ecótono Amazônia-Cerrado. As áreas de estudo estão localizada no município de Nova Ubiratã-MT, em Latossolo Vermelho. Em cada área, amostras de solo foram coletadas em quatro pontos aleatoriamente ao longo de um traçado imaginário, com 6 pseudo-repetições nas profundidades de 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m. Os resultados indicam que os maiores concentrações de estoques de carbono e nitrogênio foram obtidas na camada superficial do solo de 0,00-0,05m. No entanto, as principais alterações dos estoques de carbono e nitrogênio total com o manejo do solo ocorreram na camada superficial, onde de maneira geral, os menores valores foram mais pronunciado nas áreas de agricultura a uma taxa de 30%, 33% e 43% ao longo do perfil de 1,0 m no Cerrado, na Amazônia e no Ecótono, respectivamente. Contudo, conforme o modo de uso nas áreas de Agricultura e Pastagem ocorrem mudanças nos padrões físicos do solo (e.g. densidade) até a profundidade de 0,60m. As maiores reduções de CTC foram verificadas até a profundidade de 0,20m (~38%) na agricultura do Ecótono. Na Amazônia foram verificadas que as frações ácido húmico (AH) e humina (HU) na área de agricultura representaram os maiores com um acúmulo (8,74 g kg<sup>-1</sup>) em comparação com a área de referência de vegetação nativa (32,5g kg<sup>-1</sup>) ao longo do perfil até 1,0 m. Assim, conclui-se que a conversão de floresta nativa em sistemas agrícolas, reduz as concentrações da fração de ácido Fúlvico (FAF) em camada mais profundas, promovendo perdas de COT nas áreas de agricultura ao longo do perfil de 1,0m resultando em emissões de C-CO<sub>2</sub> na proporção de 4,9; 2,5 e 9,0 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no Cerrado, no Ecótono e na Amazônia, respectivamente.

**Palavras-chave:** Estoques de Carbono, Conversão de floresta, Biomas, Sol

## ABSTRACT

Changes in the disordered use and exploitation of land and inadequate management of pastures and crops has caused changes in soil quality, influencing its temperature and moisture content, causing accelerations such as oxidation of organic matter, as a result, there are significant losses in stocks of soil carbon in the form of CO<sub>2</sub> emissions. Thus, the present study aimed to evaluate the carbon compartments (total C, labile C, chemical and physical fractions of soil organic matter, reactivity index, humification and lability of soil organic matter, soil density) in areas of native forest, agriculture and pasture in the Cerrado, Amazon and Amazon-Cerrado Ecotone. The study areas are located in the municipality of Nova Ubiratã-MT, in Latossolo Vermelho. In each area, soil samples were collected at four points randomly along an imaginary path, with 6 pseudo-repeats at depths of 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m. The results indicate that the highest concentrations of carbon and nitrogen stocks were obtained in the 0.00-0.05m topsoil. However, the main changes in carbon and total nitrogen stocks with soil management occurred in the superficial layer, where, in general, the lowest values were more pronounced in agricultural areas at a rate of 30%, 33% and 43% along the 1.0 m profile in the Cerrado, Amazon and Ecotone, respectively. However, depending on the mode of use in the areas of Agriculture and Pasture, changes occur in the physical patterns of the soil (e.g. density) up to a depth of 0.60m. The greatest reductions in CTC were verified down to a depth of 0.20m (~38%) in Ecotone agriculture. In the Amazon, it was found that the humic acid (HA) and humin (HU) fractions in the agricultural area represented the highest with an accumulation (8.74 g kg<sup>-1</sup>) compared to the reference area of native vegetation (32.5 g kg<sup>-1</sup>) along the profile up to 1.0 m. Thus, it is concluded that the conversion of native forest into agricultural systems reduces the concentrations of the Fulvic acid fraction (FAF) in deeper layers, promoting TOC losses in agricultural areas along the 1.0m profile resulting in emissions of C-CO<sub>2</sub> in the proportion of 4.9; 2.5 and 9.0 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> in the Cerrado, Ecotone and Amazon, respectively.

**Keywords:** Carbon stocks, Forest conversion, Biomes, Sun

# 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, estudos têm reportado os problemas das mudanças climáticas no planeta decorrentes sobretudo do aquecimento global, processo conhecido pelo superaquecimento que o planeta vem enfrentando desde a era industrial, cuja principal causa está relacionada às altas concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, sendo o CO<sub>2</sub> o principal (SUGIHARA et al., 2012; BARBERA, 2019).

O Brasil é o quinto maior emissor de GEE, cuja contribuição provém principalmente da mudança no uso da terra e da agropecuária, representando 72% do total emitido no país (IEMA, 2020). As práticas inadequadas de uso e manejo do solo e da queima de combustíveis fósseis no Brasil representam cerca de 75, 91 e 94% do total de emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, respectivamente (LEÃO, 2019).

O solo é um grande reservatório de carbono, cujos estoques são maiores que da atmosfera e da vegetação terrestre em conjunto (MACHADO, 2005; LAL, 2006). O solo pode atuar como um importante sumidouro de carbono, desempenhando um papel fundamental na redução dos GEEs. Contudo, mudanças no uso da terra, quando acompanhadas de práticas inadequadas de manejo do solo, torna esse compartimento significativamente vulnerável à perda de carbono na forma de CO<sub>2</sub> (FAO, 2017; GOUGOULIAS et al., 2014).

A conversão da vegetação nativa em agrossistemas é o principal responsável pela perda de carbono do solo, contribuem atualmente com aproximadamente 24 % das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> (TILMAN et al., 2011; PAIVA & FARIA, 2007; IPCC, 2007). A própria conversão da vegetação nativa proporciona alterações significativas nos estoques de carbono orgânico do solo (COS), seja por meio do corte e queima da biomassa vegetal, seja por manejo inadequado do solo para agropecuária, alterando assim, a dinâmica de aporte de resíduos orgânicos e das frações oxidáveis do carbono (SANTOS et al., 2019; NANZER et al., 2019; IWATA et al., 2021). Diante disso, a conversão da vegetação nativa em agrossistemas, requer práticas de manejo alicerçado principalmente na manutenção e/ou aumento dos estoques de carbono orgânico do solo (COS), o que melhora também a fertilidade do solo e conseqüentemente a produtividade na agropecuária.

O solo desempenha um papel muito importante na sobrevivência dos seres vivos, e é um componente importante do ciclo do carbono, sobretudo no que se refere ao potencial de armazenar carbono na forma de matéria orgânica (LEHMANN et al., 2001). Portanto, a exploração agropecuária deve ser pautada pela adoção de sistemas de manejo eficientes do ponto de vista dos estoques de COS, caso contrário, essas ações podem provocar intensificação

das perdas de matéria orgânica do solo (MOS) e conseqüentemente, maior emissão de CO<sub>2</sub> (GMACH et al 2018; MACHADO, et al 2014) e perda da fertilidade do solo e da produtividade de pastagens e lavouras.

Se não bastasse isso, a estabilidade do carbono no solo tem limites espaciais, e temporais que estão intimamente associados às condições edáfoclimáticas, sendo um processo reversível e que não pode crescer indefinidamente quando o nível de saturação é alcançado (PAUSTIAN et al., 2016; WEST & SIX, 2007). Estudos tem demonstrado que a quantidade de COS armazenado está associado ao regime climático, à mineralogia, e à quantidade e o tipo de resíduo orgânico aportado ao solo (BENOUX et al., 2006; BAYER et al., 2006), mas sobretudo, ao manejo do solo (PETTER et al., 2017).

A perda de carbono orgânico do solo é uma das principais preocupações da transformação dos ecossistemas naturais em agrossistemas. Segundo PETTER et al. (2017), as alternativas de manejo de solo baseadas na avaliação dos estoques de COT ainda é incipiente em uma agricultura de grande escala e altamente tecnificada, com pouca informação sobre o balanço de carbono no sistema. No entanto, o manejo do solo em sistemas agrícolas deve ser pautado no balanço de carbono, em especial, nas estratégias de manejo adotadas nas áreas antropizadas, devido à grande complexidade e variabilidade do ciclo biogeoquímico do carbono em função das condições edáfoclimáticas e da vegetação (SMITH, 2012; MIRANDA et al., 2016; PETTER et al., 2017).

Portanto, os estudos visando a caracterização dos compartimentos de carbono no solo após a conversão dos ecossistemas naturais em agrossistemas devem ser realizados, cujo objetivo, deve se pautar na eficiência ou não dos sistemas de manejo adotados em relação aos compartimentos de carbono.

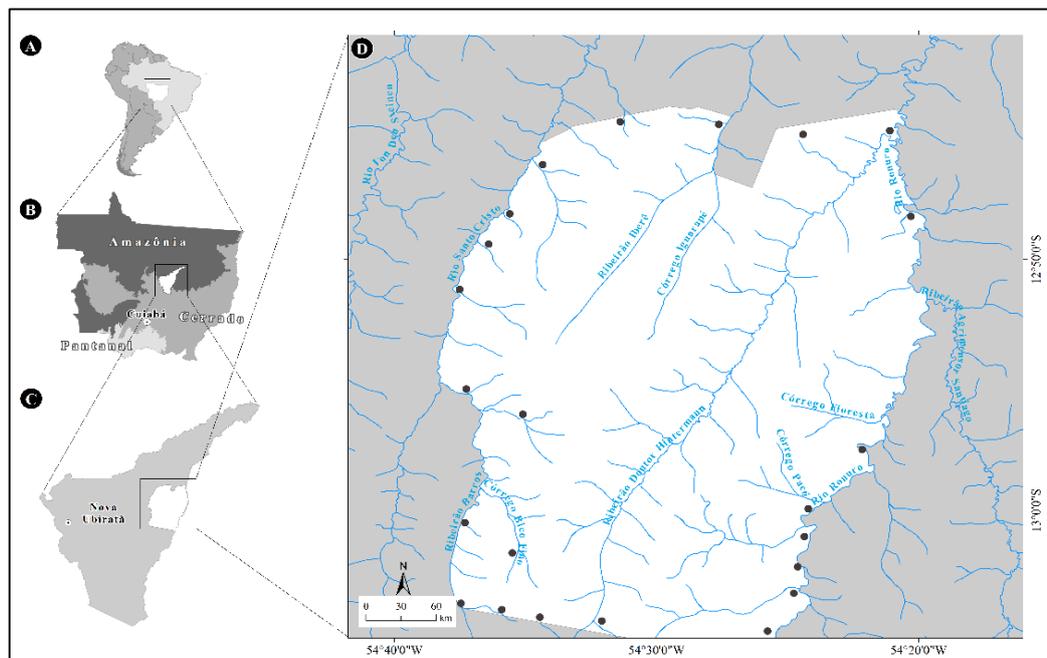
É nesse sentido que nossos estudos se alicerçam, ou seja, na hipótese de que as mudanças no uso da terra podem resultar em alterações significativas dos estoques de Carbono orgânico do solo. Dessa forma, o trabalho teve por objetivo avaliar os compartimentos de carbono em áreas de floresta nativa, agricultura e pastagem nos Biomas Cerrado, Amazônia, e Ecótono Cerrado-Amazônia. Nossos estudos, se pautam ainda, em demonstrar, se a conversão da vegetação nativa para pastagem e agricultura em longo prazo com os atuais sistemas de manejo proporcionam *input* ou *output* de carbono no solo, determinando para isso, o *quantum* de carbono e seus reflexos circula na dinâmica biogeoquímica dos compartimentos da matriz orgânica do solo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da área de estudo

#### 2.1.1 Localização da área

Este estudo foi desenvolvido a partir de amostras de solo coletadas na Estação Ecológica do Rio Ronuro (ESEC) localizada na região central do estado do Mato Grosso, município de Nova Ubitatã, entre as coordenadas geográficas  $12^{\circ} 46' 00''$ ,  $14^{\circ} 07' 00''$  de latitude sul e  $55^{\circ} 15' 00''$ ,  $54^{\circ} 19' 00''$  de longitude oeste (Figura 1). A ESEC Rio Ronuro, foi criado pelo Decreto Estadual N<sup>o</sup> 2.207/98 (alterado pela Lei Estadual 8.325/05) abrange uma área de 102.000 ha.



**Fonte:** Cristiano Alves da Costa (2020).

Figura 1. Localização da área de estudo Nova Ubitatã no estado de Mato Grosso.

A reserva está localizada em uma região com clima equatorial, apresenta características de floresta de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, com estação seca reduzida no inverno, temperaturas médias acima de  $25^{\circ}\text{C}$  e precipitação média de cerca de 2000 mm por ano. O clima predominante é do tipo Am, segundo a classificação climática global de Köppen (SILVA et al., 2009). A Unidade de Conservação pertence à bacia

Amazônica, sendo drenada pelos rios Santo Cristo, Hinternam, Von Den Steinen e Ronuro (CEPEMAR, 1998).

### 2.1.2 Características geológicas da área

As rochas na região são originárias do Cenozóico, Mesozóico e Proterozóico que formam litologias compostas por areias, siltes, cascalhos, argilitos e intercalações de arcóseos e siltitos, dentre outros. As características geomorfológicas estão associadas ao planalto central brasileiro, representado pelo Planalto Parecis e à depressão interplanática de Paranatinga, onde há variações significativas nos níveis altimétricos e nos grandes planaltos. Quanto à pedologia, predominam na área de estudo Latossolo vermelho-amarelo, Areias quartzosas (Neossolos quartzarênicos), Cambissolos e Podzólicos vermelho-amarelos (CEPEMAR, 1998).

### 2.1.3 Caracterização da vegetação das áreas de estudo

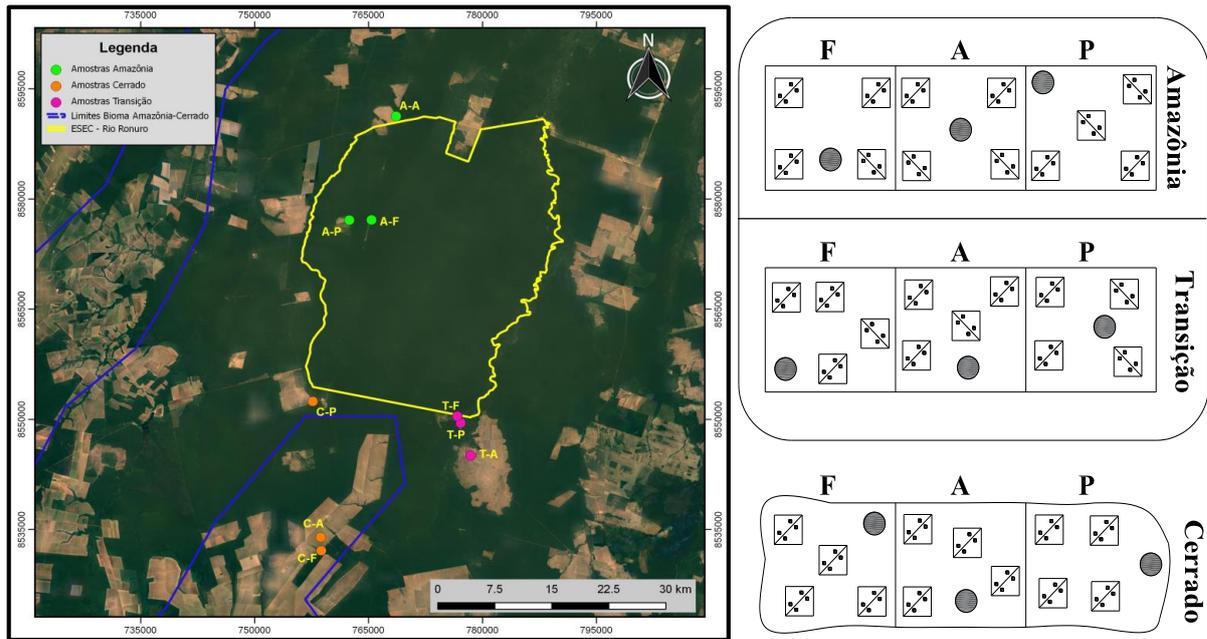
As áreas de uso da terra selecionadas para este estudo consistem em dois biomas (Amazônia e Cerrado) em uma região entre os dois biomas chamada de transição Amazônia-Cerrado, são caracterizadas na tabela seguinte.

Bioma	Ocupação	Argila	Silte g kg <sup>-1</sup>	Areia	Uso e manejo do solo
Amazônia	Vegetação Nativa	150	52	698	Vegetação nativa caracterizada por contato de Floresta Estacional Semidecidual Submontana com palmeiras e Floresta Ombrófila Aberta Submontana com palmeiras e eventualmente cipós. A UC está numa área de transição ecológica, que possui alta riqueza de espécies e habitats, sendo condicionada principalmente pelo clima, relevo e solos (CEPEMAR, 1998).
	Agricultura	165	25	810	Conversão de vegetação nativa ocorreu em 2.002. Cultivo predominante de soja no verão e milho em segunda safra. Adubação média de 80-100 Kg ha <sup>-1</sup> de K <sub>2</sub> O, 80-100 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na cultura da soja e 20 Kg ha <sup>-1</sup> de K <sub>2</sub> O, 20 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na cultura da milho. Calagem realizada em média a cada 4 a 5 anos com ~ 4 Mg ha <sup>-1</sup> .
	Pastagem	168	32	800	Conversão de vegetação nativa ocorreu em 2.001. Cultivo de <i>Urochloa decumbens</i> em sistema extensivo sem adubação suplementar.
Cerrado	Vegetação Nativa	160	25	815	Caracterizada por formação de Floresta de galeria e de Savana Florestada de proporção curta, de forma tabulares planalto. A UC está em uma área que abriga diversos ecossistemas e espécies de plantas, condicionado principalmente pelo clima tropical sazonal. (CEPEMAR, 1998)
	Agricultura	185	37	778	Conversão de vegetação nativa ocorreu em 1.998. Cultivo predominante de soja no verão e milho em segunda safra. Adubação média de 80-100 Kg ha <sup>-1</sup> de K <sub>2</sub> O, 80-100 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na cultura da soja e 20 Kg ha <sup>-1</sup> de K <sub>2</sub> O, 20 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na cultura da milho.

				Calagem realizada em média a cada 4 a 5 anos com ~ 4 Mg ha <sup>-1</sup> .	
	Pastagem	235	45	720	Conversão de vegetação nativa ocorreu em 2.002. Cultivo de <i>Urochloa decumbens</i> em sistema extensivo sem adubação suplementar.
	Vegetação Nativa	158	24	818	Caracteriza pela presença de uma estreita formação vegetacional intermediária entre o Cerrado e Amazônia apresenta tanto Floresta Ombrófila Semidecidual aberta Submontana de outro lado Savana Floresta planalto (CEPEMAR, 1998).
Transição	Agricultura	162	30	808	Conversão de vegetação nativa ocorreu em 1.983. Cultivo de <i>Urochloa decumbens</i> em sistema extensivo sem adubação suplementar até 2.002. Após cultivo predominante de soja no verão e milho em segunda safra. Adubação média de 80-100 Kg ha <sup>-1</sup> de K <sub>2</sub> O, 80-100 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na cultura da soja e 20 Kg ha <sup>-1</sup> de K <sub>2</sub> O, 20 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na cultura do milho. Calagem realizada em média a cada 4 a 5 anos com ~ 4 Mg ha <sup>-1</sup> .
	Pastagem	213	49	739	Conversão de vegetação nativa ocorreu em 1.992. Cultivo de <i>Urochloa decumbens</i> em sistema extensivo sem adubação suplementar.

#### 2.1.4 Coleta das amostras

Para a realização do presente estudo, a coleta das amostras foi realizada em novembro de 2019, em Latossolo Vermelho-Amarelo dentro da área descrita (Figura 2), em dois Biomas e no Ecótono: Transição Cerrado-Amazônia, Amazônia e Cerrado. Em cada uma dessas áreas foram delimitadas três parcelas aleatoriamente com sistema de uso e manejo do solo e foram consideradas como áreas específicas de amostragem do solo. A sucessão estudada inclui: Floresta nativa, caracterizada por uma zona sem intervenção humana; Agricultura, caracterizada por um sistema de cultivo em sucessão às culturas de soja, milho e algodão; Pastagem, caracterizada por um sistema com a intervenção da pecuária e outras culturas (gramíneas forrageiras).



**Figura 2.** Localização das áreas de pontos de coleta das amostras de solo (A). Plano de amostragem (pseudo-repetições) do solo nas áreas de floresta nativa(F), agricultura(A) e pastagem(P) nos Biomas Amazônia, Cerrado e na Transição Amazônia-Cerrado para determinar as propriedades físicas, químicas e compartimentos de carbono (B).

Nas parcelas (zonas de estudo) quatro pontos de coleta foram estimados aleatoriamente ao longo de um traçado imaginário disposto perpendicular na área/zona de estudo. Em cada área de estudo determinamos quatro traçados imaginários com as coletas descritas anteriormente, representando assim as repetições. As amostras de solos foram coletadas em 36 pontos em cada uma das nove parcelas nas profundidades de 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m. Em cada uma das nove parcelas, nas mesmas profundidades, foram coletadas amostras indeformadas com anéis volumétricos. Para cada um desses pontos, coletou-se seis pseudo-repetições, totalizando 216 amostras para os 36 pontos e 54 amostras indeformadas para os 9 pontos com anéis volumétricos (Figura 3). Após as coletas, as amostras foram identificadas, ensacadas, e levadas ao laboratório de solos da Universidade Federal do Mato Grosso/Sinop, para os procedimentos analíticos. Após a secagem das amostras ao ar por 24 horas, elas foram trituradas em cadinhos para as análises químicas e dos compartimentos de carbono.

### 2.1.5 Determinação de Carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT)

O COT e NT foram determinados via análise elementar de COT no laboratório de solos da EMBRAPA, utilizando um analisador TOC (vario TOC Cube) calculados conforme a equação. (1):

$$CT/NT = COT/NT \times \rho \times (\rho_{\text{referencia}} / \rho) \times P \quad (1)$$

Onde: CT / NT = teor de carbono orgânico total / nitrogênio total (%);

COT / NT = pool de carbono / nitrogênio (Mg ha<sup>-1</sup>);

$\rho$  = densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>);

$\rho$  referência = densidade da vegetação nativa do solo (g cm<sup>-3</sup>);

P = profundidade do perfil do solo (cm).

Para converter o estoque de C em CO<sub>2</sub>, foi utilizado o fator de conversão de 3,67 (massa molar de CO<sub>2</sub> / -M massa de C), conforme relatado por LEITE et al. (2003) e CAMPOS et al. (2013).

### 2.1.6 Fração oxidável do carbono lábil

A fração foi realizada conforme Chan et al. (2001), adaptado por Rangel et al. (2008), onde o C foi oxidado por dicromato de potássio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) em meio ácido com 3 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ácido Sulfúrico), conforme demonstrado na figura 1.

Para isso, pesou-se 0,3 g de solo (seco e moída) e, transferiu-se em erlenmeyer de 125 ml. Em seguida, adicionou-se 10 ml de dicromato de potássio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) similar às concentrações de 3 mol L<sup>-1</sup> com 1 volume (5 ml) de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) concentrado, respectivamente, para cada amostras. Após esse procedimento, foram agitadas manualmente e deixadas em repouso por 30 minutos. Depois do repouso, foi feita a leitura em bureta automática adicionando 5 gotas de indicador fenantrolina (C<sub>12</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O). A titulação foi feita com solução sulfato ferroso amoniacal [Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> .6H<sub>2</sub>O], 0,4 mol L<sup>-1</sup>.

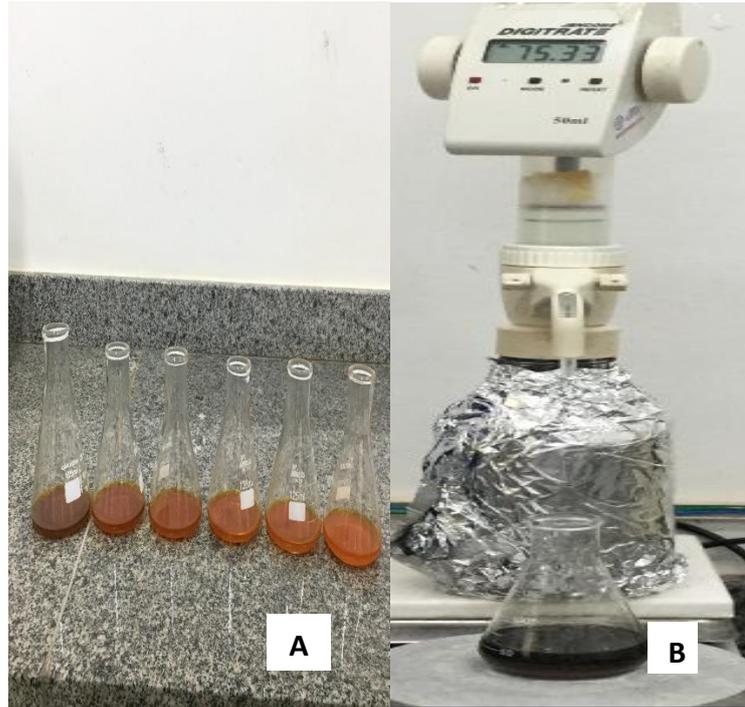


Figura 1: Frações que se distinguem a resistência da oxidação (A) e, titulação com sulfato ferroso amoniacal (B).

### 2.1.7 Determinação do fracionamento Químico de Substâncias Húmicas

A determinação do fracionamento da MOS, foi feita pela técnica de solubilidade diferencial com a adaptação de BENITES et al. (2003), obtendo-se o carbono orgânico nas frações de ácido Fúlvico (AF), ácido Húmico (AH) e Humina (HU).

Foram feitos os seguintes procedimentos: pesou-se 1,4 g de solo (seco e moída) e transferiu-se para tubos de centrífuga de 50 ml adicionando uma mistura de extração de 20ml de Hidróxido de Sódio ( $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ). Após agitação manual, estas foram deixadas em repouso por 24h. Passado este tempo, as mesmas foram centrifugadas por 30 minutos, sendo retirado em seguida o sobrenadante para que adicionara  $\text{NaOH}$  seguido de repouso por uma hora. Após centrifugar pela segunda vez, o sobrenadante foi recolhido e juntado ao previamente reservado. Acidificou-se o sobrenadante obtido na etapa anterior com gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 20%, agitou-se simultânea até obtenção de pH 1,0 e, manteve-se novamente em repouso por período de 18 h para decantação dos ácidos fúlvicos e húmicos.

Decorrido este tempo, o material acidificado foi filtrado em filtro de membrana de  $0,45\mu\text{m}$  sob vácuo, recolhendo-se cada fração dos ácidos fúlvicos e húmicos ao volume aferido e completando-se com água destilada para 50 ml (Figura 2). O solo restante nos tubos de centrífuga foi considerando como fração humina, sendo esse solo restante transferido para tubos de ensaio onde foram secados, em estufa com temperatura de  $65^\circ\text{C}$  (Figura 4 a-b).

A determinação das frações ácidos fúlvicos e húmicos foram realizadas da seguinte forma: pipetou-se 5 ml da solução para tubos de ensaio e, adicionou-se 3 ml de dicromato de potássio e 5 ml de ácido sulfúrico concentrado, agitando-se em vortex para misturar os reagentes. Após a agitação, os extratos foram levados ao bloco digestor pré-aquecido a 150°C por 30 minutos (Figura 3) e titulado com sulfato ferroso amoniacal a 0,4 mol L<sup>-1</sup>. Nos resíduos secados nos tubos de ensaio (Humina) pipetou-se 10 ml de ácido sulfúrico e depois 10 ml de dicromato de potássio, após agitado em vortex para misturar os reagentes levando-se ao bloco digestor pré-aquecido com temperatura de 150°C por 30 minutos e depois titulado com sulfato ferroso amoniacal 0,4 mol L<sup>-1</sup>.

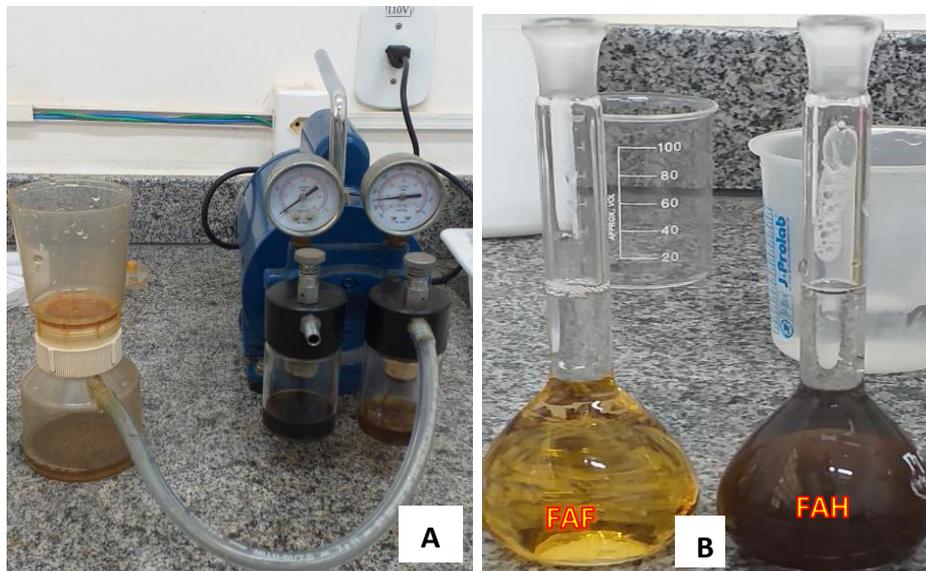


Figura 2: Filtragem a vácuo do extrato acidificado para separação das frações ácido húmico e fúlvico (A), balões volumétricos de 50 ml com as frações ácido fúlvico (FAF), e ácido húmico (FAH), (B).

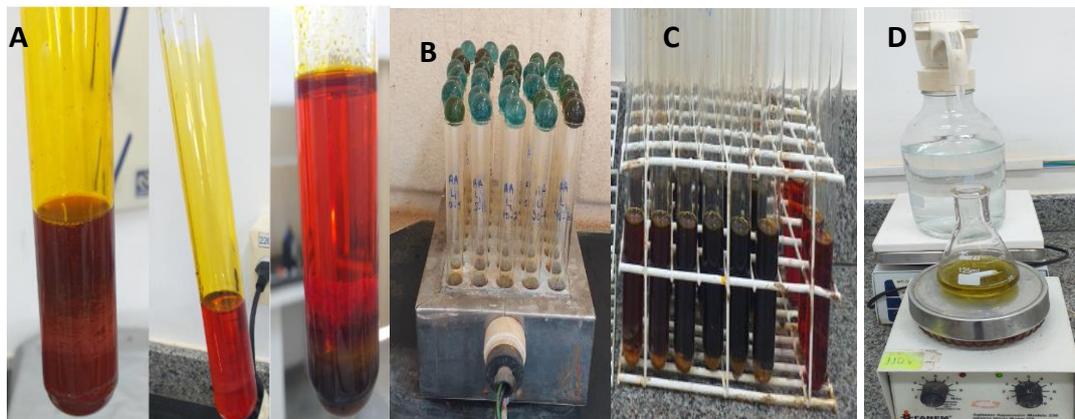


Figura 3: Etapas realizadas durante a determinação das frações das substâncias húmicas. **A:** Tubos contendo amostras de ácidos húmico, fúlvico e humina antes de serem levadas ao bloco digestor; **B:** Bloco digestor a 150°C contendo as amostras; **C:** Amostras de AF, AH e HU após deixar o bloco digestor; **D:** Titulação com sulfato ferroso amoniacal (SFA).

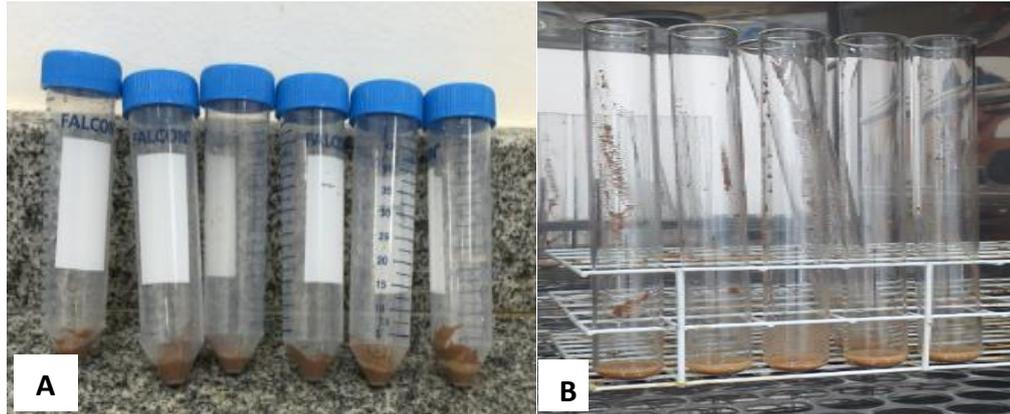


Figura 4: Resíduos restante para a determinação de Humina (a), e resíduos secado nos tubos de ensaio (Humina) (b).

### 2.1.8 Determinação da densidade do solo

Para determinar a densidade do solo, amostras indeformadas de solo foram coletadas usando-se anéis volumétricos de 5 cm de altura e diâmetro. No laboratório foram secadas a  $\pm 105^{\circ}\text{C}$  por 24 h e a densidade aparente foi calculada de acordo com a razão massa do solo seco / volume anelar (BLAKE & HARTGE, 1986).

### 2.1.9 Índice de manejo de carbono

Índice de manejo de carbono (IMC) foi estimado de acordo com BLAIR et al. (1995), de acordo com a eq. (2):

$$\text{IMC} = \text{ICC} \times \text{IL} \times 100 \quad (2),$$

onde o ICC é o conteúdo de COT do compartimento ( $\text{ICC} = \text{COT}_{\text{área cultivada}} / \text{COT}_{\text{área de referência}}$ ) e IL é o índice de labilidade ( $\text{IL} = \text{L}_{\text{área cultivada}} / \text{L}_{\text{área de referência}}$ );

$\text{L} = \text{CL} / \text{CNL}$ , em que CNL (C não lábil) é a diferença entre o COT e o CL.

### 2.1.10 Cálculo do índice de humificação

O índice de humificação (IH), proposto por CANELLAS & SANTOS (2005), foi calculado pela Eq.(3)

$$\text{HI} = [(\text{AH} + \text{AF} + \text{HU}) \text{COT}] \times 100 \quad (3)$$

HI: índice de humificação; AF: ácido fúlvico; AH: ácido húmico; HU: fração humina.

O grau de polimerização (GP) foi determinado pela proporção de carbono na fração de ácido húmico e fúlvico, seguindo a Eq. (5):

$$\text{GP} = \text{AH} / \text{AF} \quad (5)$$

## 2.2 Análise estatística

O estudo consistiu na análise de atributos do solo considerando os dois biomas e o Ecótono (Amazônia, Cerrado e Transição) e três sistemas de uso do solo (vegetação nativa, pastagem e agricultura), sendo todos os atributos determinados em seis profundidades do solo (0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m), com quatro repetições. Dado o elevado número de atributos determinados, e a uma matriz original de dados relativamente grande, optamos por realizar análise multivariada.

Primeiramente, realizamos uma análise descritiva dos dados visando estimar a média, mediana, valores mínimo e máximo, coeficiente de variação, curtose e assimetria dos dados. Posteriormente verificamos a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO e WILK, 1965). Houve a necessidade de remoção de alguns *outliers* do conjunto de dados, respeitando, contudo, o limite de 5% do total de observações. Para definição de *outliers* utilizou-se como critério valores de três vezes o intervalo interquartil no gráfico Box Plot (SANTOS et al., 2020).

Em função do grande número de atributos e observações analisadas, realizamos a análise de agrupamento hierárquico, onde foi possível classificar e/ou reconhecer a existência e posterior separação de grupos com dados homogêneos. A fim de evitar a influência do fator unidade (diferenças de escala) dos parâmetros avaliados e seu possível efeito na decisão final do estudo, o conjunto de dados foi padronizado, permitindo que as variáveis apresentassem a mesma contribuição para o cálculo do coeficiente de similaridade entre as unidades de amostragem (parcelas) ou acessos (WILKS, 2006). A padronização utilizada para a análise das 14 variáveis e 216 acessos seguiu a seguinte equação:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j}$$

Em que:  $X_{ij}$  é o valor do  $i$ -ésimo acesso da variável  $j$ ;  $\bar{X}_j$  é a média original da  $j$ -ésima variável,  $S_j$  é o desvio padrão e  $Z_{ij}$  é o valor da variável padronizada.

A obtenção de clusters semelhantes para um conjunto de 14 variáveis na análise de agrupamento hierárquico (SOKAL & SNEATH, 1973) foi realizado através da distância euclidiana entre os acessos através do algoritmo de Ward. O resultado da análise foi apresentado como um dendrograma (gráfico) para identificação dos clusters de acessos.

Para caracterização dos clusters estabelecidos no dendrograma, foi realizada a análise não-hierárquica de *K-means* levando-se em consideração o número de clusters respectivos a cada profundidade avaliada. Nessa análise, o algoritmo de particionamento define o centroide

K (referência central do cluster) com base na média dos n objetos dos K clusters formados. Isso permitiu definir os elementos de um número K de clusters com a maior distinção possível entre eles. O critério mais utilizado de homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre os grupos é o erro da soma dos quadrados com base na análise de variância e, quanto menor for este valor, mais homogêneos são os elementos dentro de cada grupo e melhor a partição (SANTOS et al., 2020).

A análise multivariada permite obter uma visão mais ampla do comportamento de variáveis em um determinado conjunto de dados, visando reduzir sua dimensionalidade com mínimas perdas de informações. Com a análise de componentes principais (ACP) é possível transformar um conjunto de variáveis originais, correlacionadas entre si, em outro conjunto de variáveis não correlacionadas (ortogonais) denominados de componentes principais. Entretanto, com o objetivo de verificar a presença de pressupostos básicos para a correta aplicação da ACP para o conjunto de dados em análise, submetemos nossos dados ao teste de Kaiser-Meyer-Olkin (maior que 0,50) e ao teste de esfericidade de Bartlett (menor que 0,05). Também verificamos a comunalidade das variáveis, cujos valores abaixo de 0,5 foram removidos e apenas autovalores  $> 1,0$  foram selecionados.

Para os cálculos de COT e emissões de CO<sub>2</sub> (balanço C no sistema) ao longo do perfil de 1,0m de solo foi utilizada a soma das médias originais não padronizadas dos agrupamentos *K-means* respectivas à cada sistema de uso do solo em cada bioma, respeitando-se contudo, os clusters formados em cada profundidade amostrada.

### **3 RESULTADOS**

#### **3.1 Análise Hierárquica e Não-Hierárquica (k-means) dos atributos**

A análise de agrupamento hierárquico permitiu a caracterização das áreas quanto à dinâmica do carbono em função do uso do solo nos Biomas Amazônia, Cerrado e no Ecótono (Figura 3 A-F). Para o conjunto de dados amostrais ao longo do perfil de 1,0 m, as variações significativas na distância euclidiana entre os acessos resultou na separação de três clusters na profundidade de 0,0-0,05m; 0,05-0,10m e 0,10-0,20m, quatro clusters na profundidade de 0,20-0,40m e 0,60-1,00m e seis clusters na profundidade de 0,40-0,60m. Os valores médios que representam as variações significativas na distância euclidiana para o conjunto de dados analisados foram de 12, 13, 15, 12, 07 e 11 para as profundidades de 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m respectivamente.

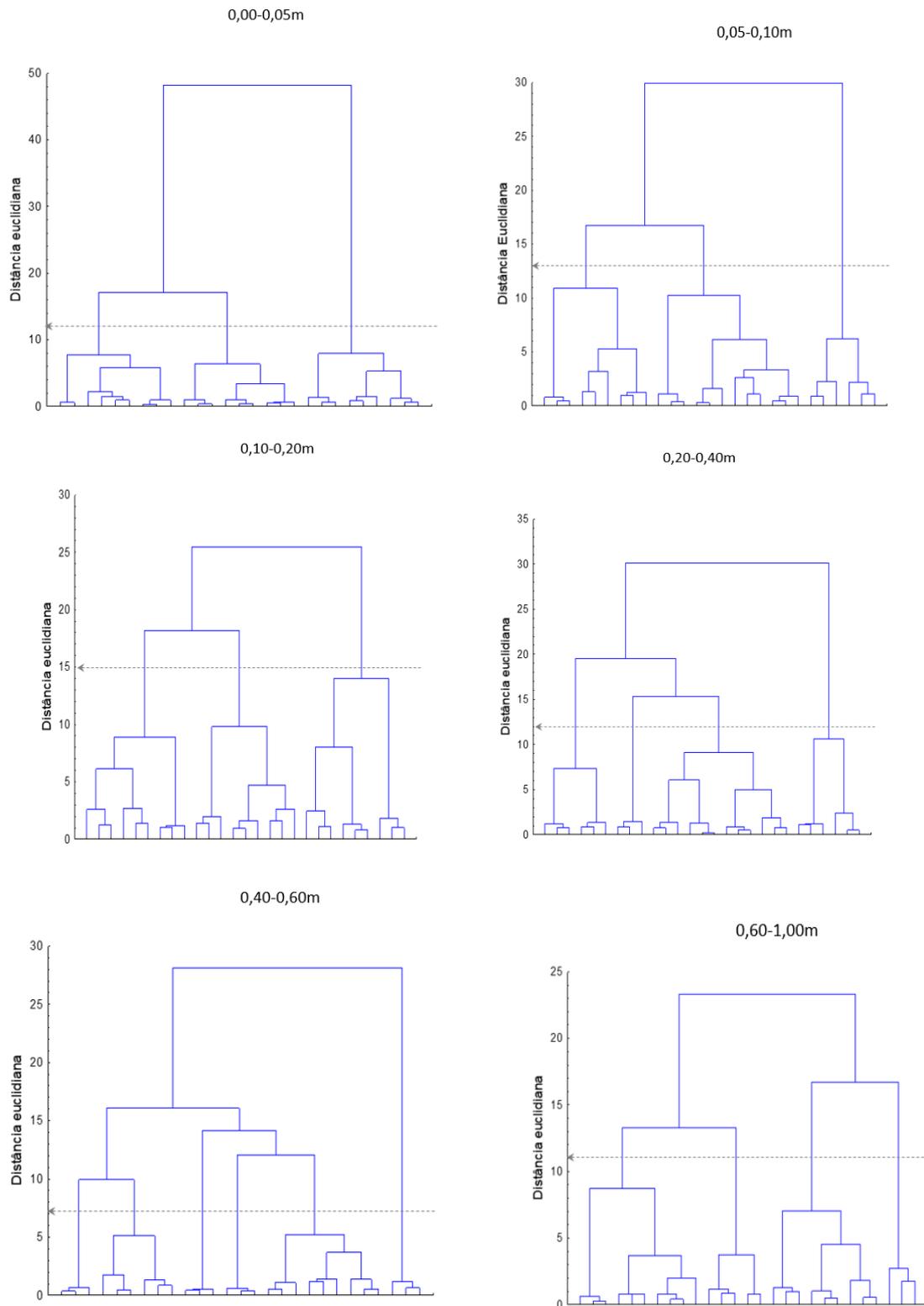


Figura 3. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de clusters segundo os teores de carbono orgânico (C), nitrogênio (N), estoques de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), densidade do solo (Ds), estoque de nitrogênio total (NT), capacidade de troca catiônica (CTC), ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), humina (HU), grau de polimerização (GP), carbono lábil (CLAB), carbono não lábil (CNLAB), índice de compartimento de carbono (ICC) e índice de manejo do carbono (IMC) nos Biomás

Cerrado, Amazônia e no Ecótono sob três sistemas de uso da terra: vegetação nativa, agricultura e pastagem nas profundidades de 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m.

Para caracterização dos clusters estabelecidos no dendrograma, foi realizada a análise não-hierárquica de *k-means* levando-se em consideração o número de clusters respectivos a cada profundidade avaliada (Figuras 4 A-F). A análise da variância multivariada (MANOVA) (Tabela 1) evidenciou que os clusters foram ordenados a partir de diferentes variáveis em cada profundidade, cujas médias dessas variáveis foram homogêneas dentro dos clusters ( $p>0,05$ ) e heterogêneas entre os clusters ( $p<0,05$ ).

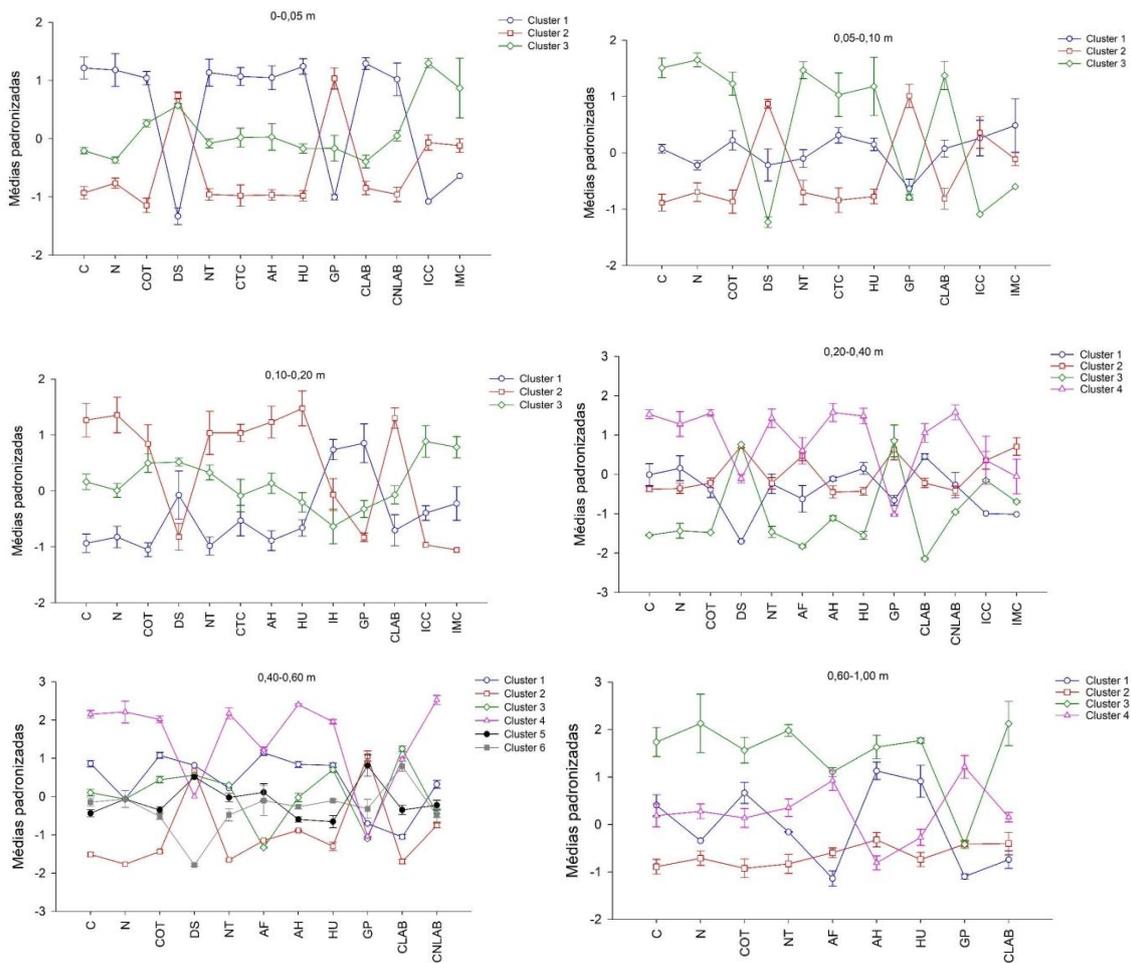


Figura 3. Médias padronizadas dos atributos químicos do solo sob diferentes usos da terra nos Bioma Cerrado, Amazônia e Ecótono de agrupamentos pela análise não-hierárquica *k-means*. Teores de carbono orgânico (C), nitrogênio (N), estoques de carbono orgânico total (COT), densidade do solo (Ds), estoque de nitrogênio total (NT), capacidade de troca catiônica (CTC), ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), humina (HU), grau de polimerização (GP), carbono lábil (CLAB), carbono não lábil (CNLAB), índice de compartimento de carbono (ICC) e índice de manejo do carbono (IMC) no Bioma Cerrado, Ecótono e Amazônia sob três sistemas de uso da terra: vegetação nativa, agricultura e pastagem nas profundidades de 0,0-0,05m; 0,05-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,40m; 0,40-0,60m e 0,60-1,00m.

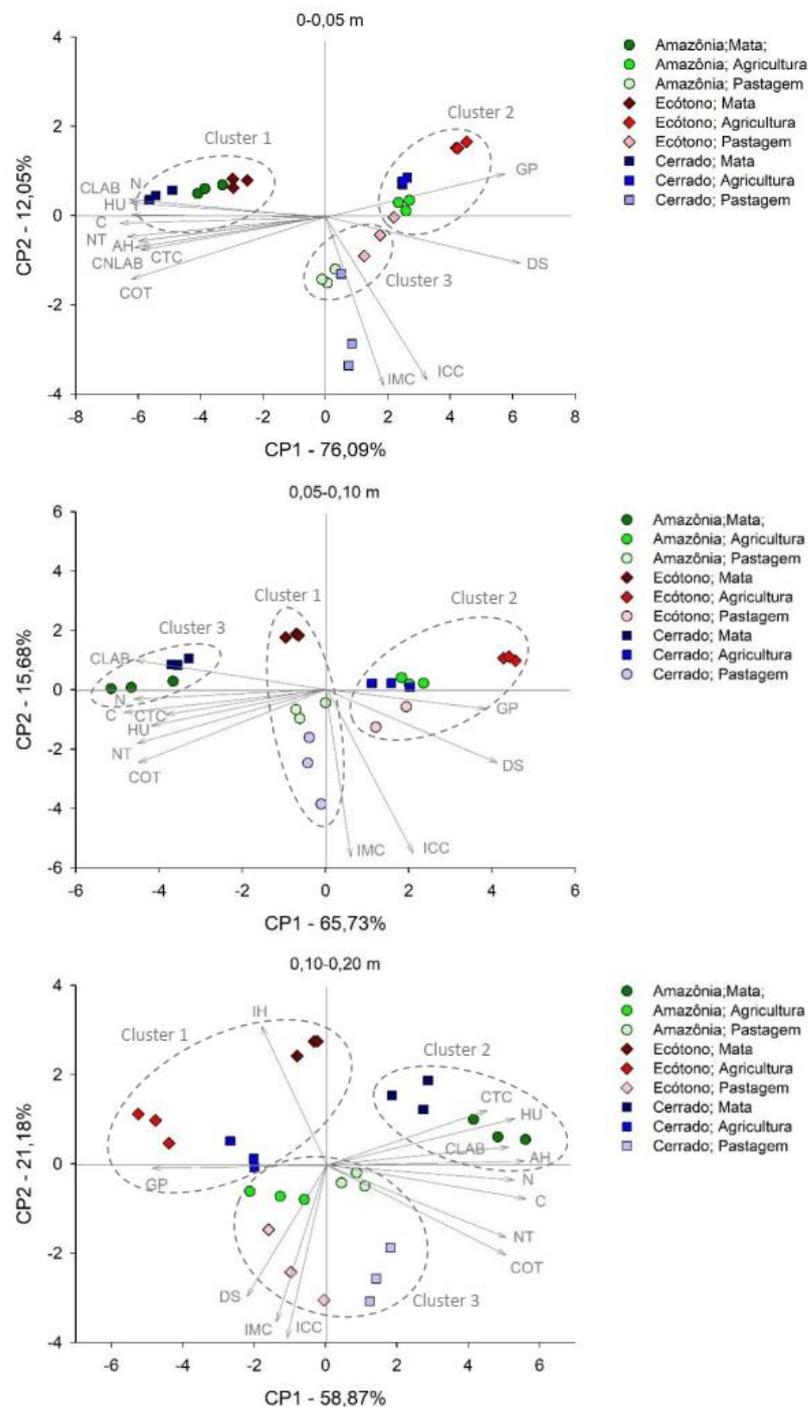
A diferença significativa entre os clusters para cada variável analisada em cada profundidade pode ser melhor compreendida ao se analisar os centroides da análise de *k-means* e dos erros-padrão das médias padronizadas de cada atributo químico do solo. Esses resultados

confirmam os adequados valores de distância euclidiana utilizados para a separação dos clusters na análise hierárquica (dendrograma).

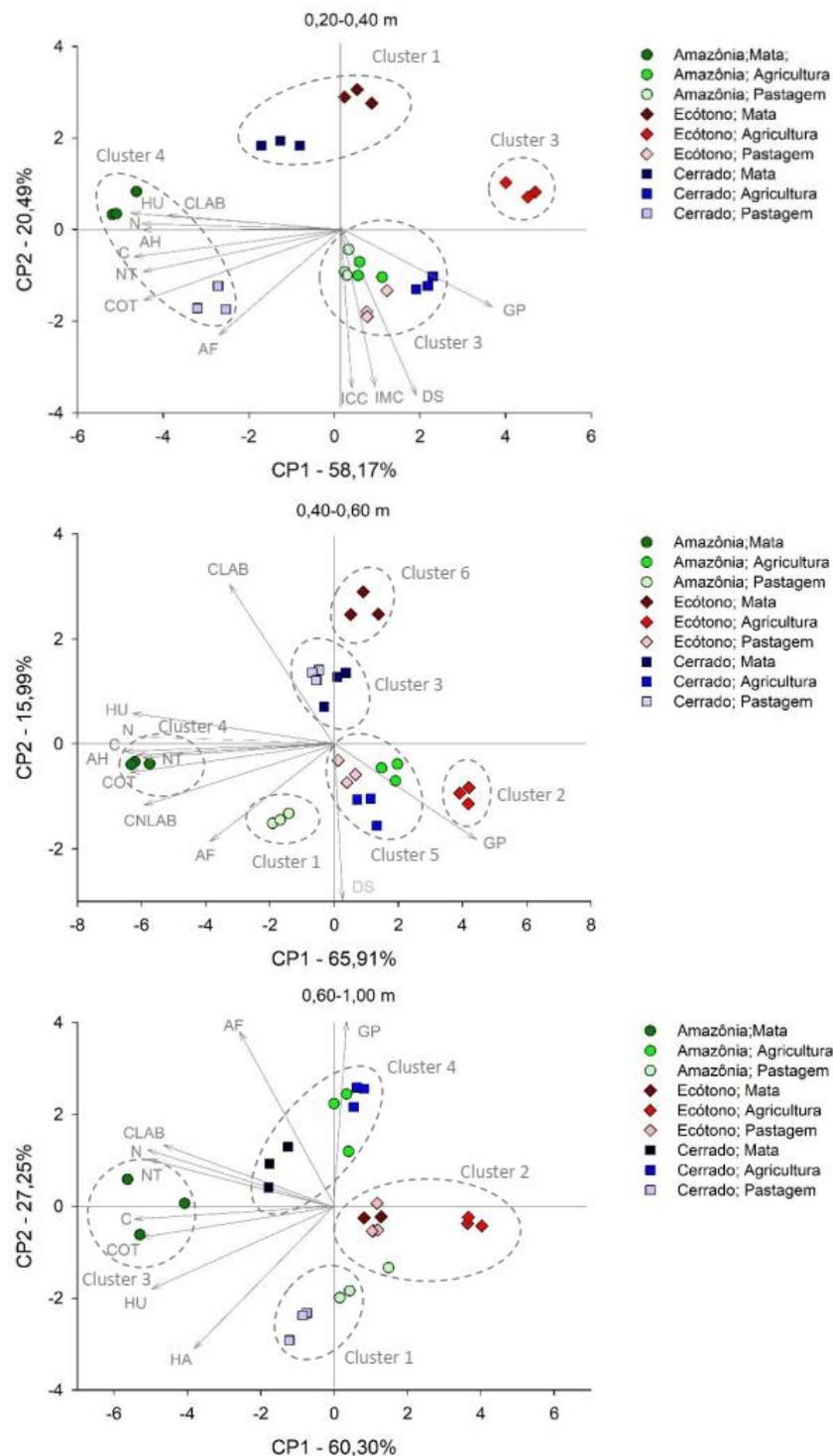
De acordo com a análise de componentes principais(ACP), é possível verificar como as variáveis se correlacionam a partir das análise hierárquica e não-hierárquica k-means. Para a elaboração dos CP's utilizamos as variáveis significativas considerando apenas autovetores com correlação maior ou igual 0,5. Com isso, foi possível explicar de 78,6% a 88,1% da variabilidade da matriz original dos atributos nas diferentes profundidades, cujos dados, estão apresentados nos gráficos biplot dos CP's abordados adiante (Figura 5 e 6).

### 3.2 Carbono e Nitrogênio Total

Independentemente do bioma, a camada superficial do solo (0,0-0,05m), apresentou os maiores valores ( $p < 0,05$ ) dos teores ( $C=2,25\%$  e  $N=0,18\%$ ) e estoques de carbono ( $COT=12,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), nitrogênio total ( $NT=0,97 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), carbono lábil ( $CLAB=11,6 \text{ g kg}^{-1}$ ) e carbono não-lábil ( $CNLAB=10,1 \text{ g kg}^{-1}$ ) foram verificados nas áreas de vegetação nativa, enquanto que, os menores valores foram verificados nas áreas sob agricultura ( $C=0,68\%$ ;  $N=0,05\%$ ;  $COT= 3,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ;  $NT=0,26 \text{ Mg ha}^{-1}$ ;  $CLAB=3,7 \text{ g kg}^{-1}$  e  $CNLAB=3,1 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Figura 6A e Tabela 1). Na profundidade de 0,05-0,20m os maiores valores de C ( $\bar{X}$  1,41%), N ( $\bar{X}$  0,10%), COT ( $\bar{X}$  12,8  $\text{Mg ha}^{-1}$ ), NT ( $\bar{X}$  0,97  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) e CLAB ( $\bar{X}$  6,55  $\text{g kg}^{-1}$ ) foram observados para as áreas de vegetação nativa dos biomas Amazônia e Cerrado, ao passo que, os menores valores foram verificados nas áreas de agricultura no Cerrado e no Ecótono ( $\bar{X}C=0,58\%$ ;  $\bar{X}N=0,05\%$ ;  $\bar{X}COT= 5,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ ;  $\bar{X}NT=0,36 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $\bar{X}CLAB=3,2 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Figuras 5B e C). Já, na profundidade de 0,20-1,00m, apenas a área de vegetação nativa na Amazônia apresentou valores superiores de C, N, COT, NT e CLAB, e novamente, a área de agricultura no Ecótono apresentou valores inferiores (Figuras 6A, B e C).



**Figura 4.** Análise de componentes principais dos atributos químicos do solo sob diferentes usos do solo no Bioma Cerrado, Amazônia e no Ecótono. Teores de carbono orgânico (C), nitrogênio (N), estoques de carbono orgânico total (COT), densidade do solo (Ds), estoque de nitrogênio total (NT), capacidade de troca catiônica (CTC), ácido húmico (AH), humina (HU), grau de polimerização (GP), carbono lábil (CLAB), carbono não lábil (CNLAB), índice de compartimento de carbono (ICC) e índice de manejo do carbono (IMC) no Bioma Cerrado, Ecótono e Amazônia sob três sistemas de uso da terra: vegetação nativa, agricultura e pastagem. Profundidades de 0-0,05m (A); 0,05-0,10m (B) e 0,10-0,20m (C).



**Figura 5.** Análise de componentes principais dos atributos químicos do solo sob diferentes usos da terra no Bioma Cerrado, Amazônia e no Ecótono. Teores de carbono orgânico (C), nitrogênio (N), estoques de carbono orgânico total (COT), densidade do solo (Ds), estoque de nitrogênio total (NT), ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), humina (HU), grau de polimerização (GP), carbono lábil (CLAB), carbono não lábil (CNLAB), índice de compartimento de carbono (ICC) e índice de manejo do carbono (IMC) no Bioma Cerrado, Ecótono e Amazônia sob três sistemas de uso da terra: vegetação nativa, agricultura e pastagem. Profundidades de 0,20-0,40m (A); 0,40-0,60m (B) e 0,60-1,00m (C).

As maiores diferenças para os estoques de COT da vegetação nativa comparada as áreas agrícolas foram verificadas até a profundidade de 0,10m (separação dos clusters). Os estoques

de COT nas áreas de vegetação nativa na profundidade de 0,00-0,10m foram de  $\sim 22,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ , enquanto que, nas áreas de agricultura esses valores foram de  $\sim 8,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ , representando assim, uma redução de  $\sim 63\%$  devido à conversão da floresta em lavoura.

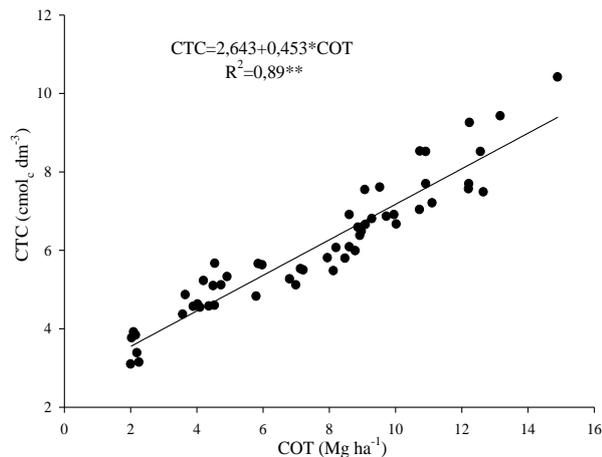
### 3.3 Densidade do solo

Os resultados mostraram que a conversão de vegetação nativa para agricultura e pastagem proporcionou aumento ( $p < 0,05$ ) da densidade do solo na faixa de até 0,60m de profundidade em ambos os biomas (Figuras 5 A, B, e C), cujos valores oscilaram de 1,43 a 1,64  $\text{g cm}^{-3}$ . Por outro lado, as menores densidades foram encontradas nos sistemas de vegetação nativa da Amazônia ( $\bar{X} 1,21 \text{ g cm}^{-3}$ ) até a profundidade de 0,20m e na vegetação nativa do Cerrado e Ecótono de 0,20-0,60m ( $\bar{X} 1,14 \text{ g cm}^{-3}$ ). Densidades abaixo da profundidade de 0,60m não foram influenciadas ( $p > 0,05$ ) pelo uso do solo.

### 3.4 Capacidade de troca catiônica (CTC)

As alterações ( $p < 0,05$ ) na CTC em função do uso do solo se deram tão somente até a profundidade de 0,20m (Figuras 5 A, B, C e Tabela 1). Na camada mais superficial (0,0-0,05m) e de maior sensibilidade às alterações de manejo, independentemente dos biomas, os maiores valores de CTC foram verificados nas áreas de vegetação nativa. Entretanto, na profundidade de 0,05-0,20m a maior CTC foi verificada apenas nas áreas de vegetação nativa da Amazônia e Cerrado ( $\bar{X} 7,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). Por outro lado, as áreas de agricultura, sobretudo no Ecótono, apresentaram reduções ( $\sim 38\%$ ) expressivas na CTC do solo comparado à vegetação nativa até a profundidade de 0,20m.

Em função da reduzida contribuição da matriz mineral para a CTC em Latossolos, esta é altamente dependente dos estoques de COT. Os dados de CTC se correlacionam positivamente com os valores de COT no solo até a profundidade de 0,20m. Visando melhor elucidar a dependência da CTC em relação aos estoques de COT no solo, realizamos uma análise com o objetivo de verificar essa correlação (Figura 7). Considerando o valor médio dos estoques de COT ( $8,52 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) até a profundidade de 0,10m em todas as áreas avaliadas, a contribuição média do COT para a CTC foi de  $\sim 60\%$ . Nesse cenário, quanto maior os estoques de COT, maior será a contribuição da matriz orgânica para a CTC (relação linear), visto que, a contribuição da matriz mineral para a CTC é de  $\sim 2,64 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ .



**Figura 6.** Capacidade de troca catiônica (CTC) em função dos estoques de carbono orgânico total (COT) de Latossolos sob vegetação nativa, agricultura e pastagem da Amazônia, Cerrado e no Ecótono na profundidade de 0,0-0,10m. \*\* significativo a 1% de probabilidade pelo teste F

### 3.5 Frações químicas da matéria orgânica do solo

De maneira geral, ao longo do perfil de 1,0 m de solo, os teores de C nas frações ácido húmico (AH) e humina (HU) foram significativamente maiores nas áreas de vegetação nativa (Figuras 5A, B, C, 6A, B e C e Tabela 1) com valores acumulados de  $8,74 \text{ g kg}^{-1}$  e  $32,5 \text{ g kg}^{-1}$  respectivamente. Entretanto, na vegetação nativa da Amazônia os maiores valores de AH e HU estiveram presentes ao longo de todo o perfil do solo (até 1,0m), enquanto que, na vegetação nativa do Cerrado e do Ecótono os maiores valores ficaram restritos às camadas de 0,0-0,05m e 0,0-0,20m. Já, os menores valores acumulados de AH ( $1,59 \text{ g kg}^{-1}$ ) e HU ( $13,3 \text{ g kg}^{-1}$ ) ao longo do perfil de 1,0m de solo se deram nas áreas de agricultura em ambos os biomas, sobretudo, para a área de agricultura do Ecótono abaixo de 0,40m.

A fração ácido fúlvico foi influenciada ( $p < 0,05$ ) pelo uso do solo a partir da profundidade de 0,20m, cujos menores valores a partir dessa camada foram verificados nas áreas de agricultura no Ecótono (0,20-1,0m), pastagem no Cerrado (0,40-1,0m) e pastagem na Amazônia (0,60-1,0m). Os resultados demonstram claramente que a conversão de vegetação nativa em agrossistemas reduz as concentrações de AF em camadas mais profundas.

### 3.6 Índices de manejo de carbono associado às frações químicas da matéria orgânica do solo

O grau de polimerização (GP) do carbono do solo foi significativamente afetado pelo uso do solo em todas as profundidades avaliadas ( $p < 0,05$ ) (Figuras 5A, B, C, 6A, B e C). Independentemente dos biomas, os maiores valores de GP ( $\bar{X}$  4,81) ao longo do perfil do solo

analisado foram verificados nas áreas de agricultura, enquanto que, menor GP ( $\bar{X}$  1,06) foi verificado nas áreas de vegetação nativa.

Os índices de compartimento de carbono (ICC) e manejo do carbono (IMC) foram afetados pelo uso do solo até a profundidade de 0,40m (Figuras 5A, B, C e 6A), cujos maiores valores ( $\bar{X}$  0,86 e  $\bar{X}$  116), se deram nas áreas de pastagens, independentemente dos biomas. Entretanto, não diferindo das áreas de pastagens na profundidade de 0,20-0,40m, as áreas de agricultura do Cerrado e da Amazônia também apresentaram valores semelhantes ( $\bar{X}$  0,86) para ICC. Contudo, esses valores foram inferiores à da vegetação nativa (base de referência = 1,0). Os valores de IMC nas áreas de pastagens ( $\bar{X}$  116), foram superiores da vegetação nativa (base de referência=100), enquanto que, nas áreas de agricultura ( $\bar{X}$  44) esse valor ficou abaixo.

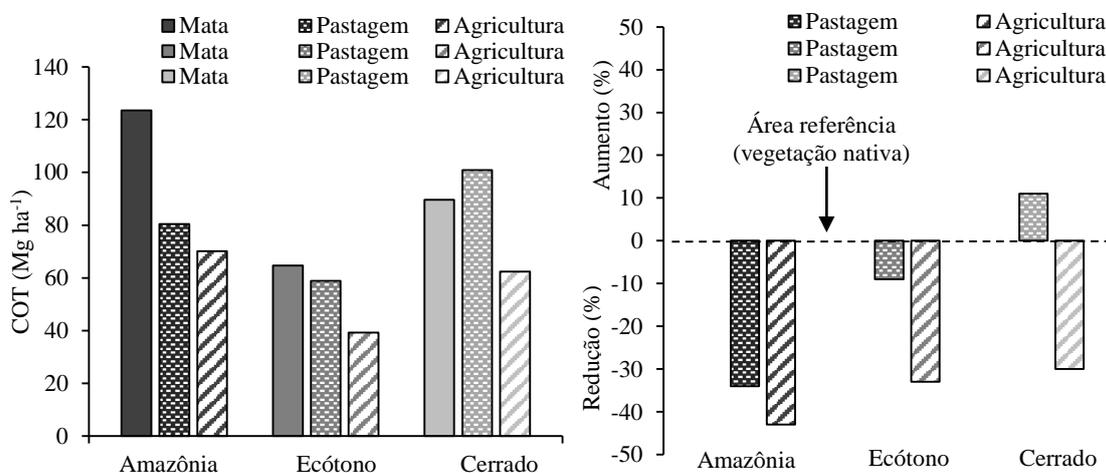
Tabela 1 Médias não padronizadas de atributos para cada cluster de acordo com a análise de agrupamento k-

Cluster	Variáveis <sup>1</sup>													
	C	N	COT	DS	NT	CTC	AH	HU	AF	GP	CLAB	CNLAB	ICC	IMC
	<b>Profundidade (0,0-0,05m)</b>													
1	2,25	0,18	12,2	1,10	0,97	8,64	2,53	9,69	ns	0,99	11,6	10,1	1,00	100
2	0,68	0,05	3,86	1,54	0,26	4,76	0,57	3,28	ns	3,62	3,74	3,10	0,32	38
3	1,21	0,07	9,27	1,50	0,56	6,65	1,54	5,61	ns	2,07	5,43	6,71	0,75	111
	<b>Profundidade (0,05-0,10m)</b>													
1	1,01	0,06	7,37	1,43	0,45	5,92	ns	4,75	ns	1,62	5,13	ns	0,56	152
2	0,62	0,05	4,32	1,61	0,32	4,34	ns	2,94	ns	3,82	3,40	ns	0,60	68
3	1,61	0,12	10,2	1,27	0,77	6,91	ns	6,77	ns	1,42	7,65	ns	1,00	100
	<b>Profundidade (0,10-0,20m)</b>													
1	0,54	0,04	5,98	1,44	0,41	4,66	0,55	2,80	ns	4,27	3,03	ns	0,38	45
2	1,21	0,09	15,5	1,28	1,17	6,51	1,94	5,70	ns	1,18	5,45	ns	1,00	100
3	0,87	0,06	13,8	1,56	0,90	5,19	1,22	3,42	ns	2,11	3,80	ns	1,23	100
	<b>Profundidade (0,20-0,40m)</b>													
1	0,64	0,05	14,7	1,15	1,04	ns	0,78	2,78	1,40	1,82	3,63	2,76	1,00	100
2	0,55	0,04	16,0	1,61	1,04	ns	0,57	2,36	1,98	4,25	3,03	2,46	0,86	100
3	0,26	0,02	6,01	1,62	0,38	ns	0,17	1,54	0,76	4,67	1,33	1,34	0,53	19
4	1,01	0,07	30,2	1,46	1,93	ns	1,80	3,75	2,05	1,12	4,16	6,59	0,86	56
	<b>Profundidade (0,40-0,60m)</b>													
1	0,62	0,03	19,5	1,64	0,94	ns	1,03	2,94	2,10	2,04	1,74	2,49	ns	ns
2	0,21	0,01	4,59	1,61	0,23	ns	0,09	1,25	0,61	0,84	1,23	0,84	ns	ns
3	0,49	0,03	15,8	1,59	0,97	ns	0,56	2,85	0,49	1,32	3,58	1,32	ns	ns
4	0,85	0,06	25,2	1,48	1,68	ns	1,89	3,85	2,14	5,87	3,36	5,87	ns	ns
5	0,40	0,03	11,0	1,58	0,85	ns	0,24	1,76	1,43	1,65	2,31	1,65	ns	ns
6	0,45	0,03	10,0	1,13	0,68	ns	0,43	2,20	1,29	1,25	3,22	1,25	ns	ns
	<b>Profundidade (0,60-1,00m)</b>													
1	0,38	0,02	24,5	ns	1,29	ns	0,50	2,39	0,38	0,76	1,29	Ns	ns	ns
2	0,26	0,02	14,5	ns	0,92	ns	0,28	1,54	0,59	2,13	1,52	Ns	ns	ns
3	0,50	0,05	30,2	ns	2,47	ns	0,58	2,83	1,22	2,12	3,25	Ns	ns	ns
4	0,36	0,03	21,2	ns	1,57	ns	0,21	1,78	1,15	5,38	1,90	Ns	ns	ns

<sup>1</sup>C: teor de carbono orgânico; N: teor de nitrogênio; COT: estoque de carbono orgânico total; DS: densidade do solo; NT: estoque de nitrogênio total; CTC: capacidade de troca catiônica; AF: ácido fúlvico; AH: ácido húmico; HU: humina; GP: grau de polimerização; CLAB: carbono lábil; CNLAB: carbono não lábil; ICC: índice de compartimento de carbono e IMC: índice de manejo do carbono nos Biomass

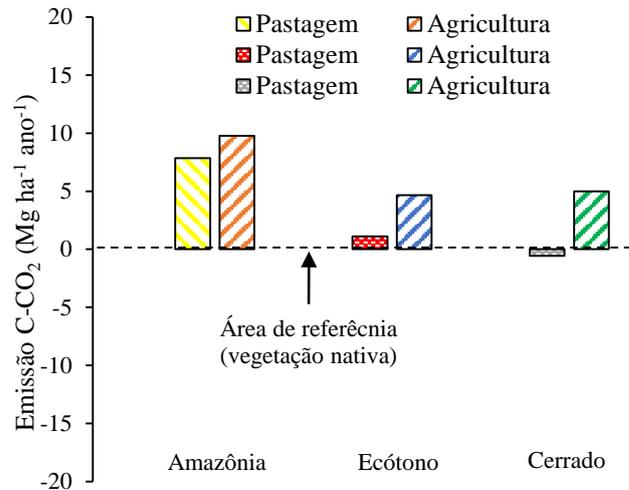
### 3.7 Estoques de carbono no sistema

Os maiores estoques de COT até 1,0m de profundidade foram verificados na vegetação nativa da Amazônia ( $123,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), enquanto, as áreas de agricultura no Ecótono apresentaram os menores estoques ( $39,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Figura 7A). Com exceção da pastagem no Cerrado, a conversão de vegetação nativa para agrossistemas reduziu significativamente ( $p < 0,05$ ) os estoques de COT ao longo de 1,0m do perfil do solo, sendo as maiores reduções verificadas nas áreas de agricultura (Figura 7B). As reduções nos estoques de COT nas áreas de agricultura foram equivalentes a 30%, 33% e 43% nos biomas Cerrado, Ecótono e Amazônia respectivamente.



**Figura 7.** Estoques e aumento/redução percentual de carbono orgânico total (COT) nas profundidades de 0,0-1,0m em um Latossolo sob vegetação nativa, agricultura e pastagem na Amazônia, Cerrado e no Ecótono.

As significativas perdas de COT nas áreas de agricultura resultaram em emissões de C-CO<sub>2</sub> na ordem de 4,9; 9,8; 2,5 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> ao longo de 1,0m de profundidade no Cerrado, Amazônia e no Ecótono, respectivamente, desde o momento da conversão (20 anos) (Figura 8). Nossos dados revelam perdas de COT e conseqüentemente de C-CO<sub>2</sub> com comportamento diferenciado entre os biomas Amazônia, Cerrado e no Ecótono. As reduções proporcionais de COT no solo até 1,0m de profundidade após a conversão de vegetação nativa em agricultura na Amazônia é superior em ~ 43% às perdas no Cerrado.



**Figura 8.** Emissão de C-CO<sub>2</sub> ao longo do perfil de 1,0m em um Latossolo sob agricultura e pastagem na Amazônia, Ecótono e Cerrado.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Carbono e Nitrogênio Total

Os maiores valores dos teores e estoques de C e N, CLAB e CNLAB verificados nas áreas de vegetação nativa se deve ao maior aporte de resíduos vegetais (serapilheira) associado à reduzidas taxas de mineralização em ambientes não antrópicos (LEITE et al., 2013), decorrente sobretudo, da ausência de perturbação do solo (PETTER et al., 2017). Entretanto, os aportes de resíduos vegetais nas áreas de vegetação nativa impactam de maneira diferenciada os teores e estoques de C e N, CLAB e CNLAB ao longo do perfil de 1,0m de solo nos biomas Amazônia, Cerrado e no Ecótono.

Nossos resultados revelam que a vegetação nativa do Cerrado e do Ecótono não conseguem estocar carbono e nitrogênio em profundidades abaixo de 0,20m em níveis compatíveis à vegetação nativa da Amazônia. Daí a importância de se determinar COT e NT em profundidades de até 1,00m. Caso contrário, os resultados podem levar à interpretações equivocadas acerca desses estoques em camadas superficiais, sobretudo, quando se objetiva verificar a contribuição das floresta no *pool* de carbono e nitrogênio para o ecossistema terrestre.

Estudos apontam para uma deposição anual de serapilheira em áreas de vegetação nativa da Amazônia na ordem de ~13,0 Mg ha<sup>-1</sup> (ALMEIDA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2017; SALES et al., 2020), no Cerrado de ~5,0 Mg ha<sup>-1</sup> (VALADÃO et al., 2016; MATOS et al., 2017) e Ecótono Amazônia-Cerrado de ~8,0 Mg ha<sup>-1</sup> (ALMEIDA et al., 2015; VALADÃO et

al., 2016). Isso explicaria os maiores teores e estoques de C e N, CLAB e CNLAB ao longo do perfil de 1,0m de solo nos biomas Amazônia comparado ao Cerrado e Ecótono.

Portanto, a redução dos estoques de COT (-14,2 Mg ha<sup>-1</sup>) verificado na camada superficial do solo (0,0-0,10m) nas áreas agrícolas comparado à vegetação nativa se deve ao menor aporte de resíduos em superfície decorrente do sistema de cultivo adotado nessas áreas (caracterizado pelo cultivo de soja no verão e milho em segunda safra) e das respectivas técnicas de manejo implementadas. Nossos resultados demonstram inequivocamente uma maior sensibilidade da camada superficial (até 0,10m) às alterações nas técnicas de manejo do solo, corroborando outros estudos (e.g. LEITE et al., 2010; POEPLAU et al., 2015), nos quais também se verificou que alterações significativas nos estoques de COT ocorrem de forma mais intensa em profundidades de até 0,20m.

É nítido que a conversão de floresta nativa para agricultura, independentemente do bioma, quando não manejada adequadamente, resulta em perdas significativas de carbono e nitrogênio do solo, corroborando com outros estudos (PETTER et al., 2017; BONINI et al., 2018). Contudo, a magnitude das perdas são inerentes ao manejo adotado nessas áreas, cuja sustentabilidade do sistema deve se apoiar na premissa básica de, considerar um aporte de resíduos vegetais compatível com as vegetações nativas dos respectivos Biomas. Mas não só isso, o manejo adotado em áreas agrícolas deve preservar ao máximo o *pool* de carbono no solo. Comumente em áreas agrícolas, cujo sistema, é caracterizado pelo cultivo de soja no verão e milho em segunda safra, verificamos manejos inadequados que resultam no aumento das perdas de C e N e a própria fertilidade natural do solo. Por exemplo, o uso de grade niveladora visando destruir os restos culturais após a colheita da cultura do milho em segunda safra acelera o processo de oxidação da matéria orgânica, visto que a proteção física da matriz orgânica fica comprometida por alterações deletérias na estrutura e agregação do solo, expondo a MOS e às ações dos microrganismos (FELIPE, 2016; SINGH et al., 2017). Com isso, o produtor perde fertilidade e fica dependente de maior adição de fertilização, encarecendo a produção e reduzindo a produtividade em comparação com sistemas de manejo que resultam em incremento da MOS.

#### **4.2 Densidade do solo**

O manejo adotado nas áreas agrícolas estudadas explicam, em parte, o aumento das densidades do solo comparado à vegetação nativa. Entretanto, tratamos como surpresa os efeitos da conversão da vegetação nativa em agricultura e pastagem na densidade do solo abaixo da camada de 0,20m, pois, esperávamos maiores densidades apenas na camada superficial, visto

se tratar da profundidade mais suscetível ao intenso trânsito de máquinas e operações de cultivo. Estudos (LANZANOVA et al., 2007; LIMA et al., 2016; RENATA et al., 2021) referenciaram o trânsito de máquinas e o uso de implementos aradores de solo como importantes condicionadores para o aumento da densidade do solo em profundidades de até 0,20m.

O aumento da densidade do solo, decorrente de sistemas inadequados de manejo das culturas, podem implicar em alterações físicas que limitam condições ideais para o desenvolvimento vegetal (COLLARES et al., 2008; BLAINSKI et al., 2008; LIMA et al., 2016). É o caso de densidades superiores a  $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ , condição que normalmente limita o desenvolvimento de culturas como a soja e milho (SILVA et al., 2006; FREDDI et al., 2009).

Embora, não determinada nesse estudo, nossos resultados evidenciam que possivelmente o crescimento do sistema radicular das plantas cultivadas (soja, milho e capim) e dos aportes de material orgânico ( $6 - 7 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) estão sendo insuficientes para a melhoria das condições físicas do solo. Ademais, devemos tratar essa situação como um *lose-lose*, onde a densidade limita o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, resultando em perdas de carbono em profundidade, limitação que não condiciona melhorias na densidade do solo.

### 4.3 Capacidade de troca catiônica (CTC)

A correlação positiva da CTC com COT comprovam com elevada solidez, que a CTC dos Latossolos na região de transição da Amazônia/Cerrado são altamente dependentes dos estoques de COT, e que, a perda dos estoques a médio e longo prazo pode comprometer seriamente a capacidade produtiva dessas áreas.

A elevada dependência da CTC com a matriz orgânica do solo se justifica pela baixa contribuição da matriz mineral com o complexo de troca catiônica dos Latossolos de cerrado. Isso se deve à composição da matriz mineral desses solos, caracterizada sobretudo pela presença de gibsitita, goetita, hematita e caulinita (Embrapa, 2015). Nas condições de pH dos solos agricultáveis (5,5 a 6,5) gibsitita, goetita e hematita pouco contribuem para a CTC dos solos, visto que, o ponto de carga zero (PCZ) desses minerais é superior 7,0 (SPARKS, 1995; MEUER, 2006; RIBEIRO et al., 2011).

Resta, portanto, a contribuição da caulinita, cujo ponto de carga zero é próximo a  $\sim 3,5-4,0$  (SILVA et al., 2008). O aumento do COT proporciona maior quantidade de cargas negativas no solo, e conseqüentemente, eleva a adsorção dos cátions, refletindo assim, no aumento da CTC. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato da MOS contribuir com o aumento de carga variável negativa através da dissociação de grupos funcionais ácidos, reduzindo o PCZ do solo (SANTOS e al., 2009; BRADY e WEIL, 2013).

#### **4.4 Frações químicas da matéria orgânica do solo**

Os maiores valores de C nas frações AH e HU da matéria orgânica ao longo do perfil de 1,0m de solo na área de vegetação nativa da Amazônia é resultado do maior aporte de resíduos orgânicos na superfície do solo. Os maiores valores de C-HU eram esperados, pois essa fração é constituída por moléculas altamente complexas e intimamente ligada à fração mineral do solo, sobretudo aos óxidos (SPARKS, 2001). Tais características conferem elevada estabilidade molecular, tornando-a menos suscetíveis a polimerização (FONTANA et al., 2006; ROSSI et al., 2011). Contudo, os elevados teores de C-HU, em especial na vegetação nativa da Amazônia, parecem evidenciar as propriedades coloidais da matriz orgânica do solo, tais como, baixa densidade do solo e elevada CTC.

Era de se esperar que o maior aporte de resíduos vegetais nas áreas de vegetação nativa proporcionasse maiores teores de C-AF pois tem condição mais favorável para acúmulo de C, comparado às áreas de agricultura e pastagem, visto que, essa fração é a mais influenciada pela deposição de resíduos de maior labilidade. Embora, em tese, a maior deposição de resíduos levaria a maiores teores de C-AF, fato este não confirmado. Uma possível explicação para a ausência de diferença significativa entre os teores de C-AF das áreas de vegetação nativa para agricultura/pastagem até a profundidade de 0,0-0,20m seria uma maior movimentação vertical no perfil dos solos das áreas de vegetação nativa. Isso se explicaria pela menor densidade do solo nas áreas de vegetação nativa, favorecendo a infiltração de água no perfil associado ao baixo peso molecular dessa fração e a elevada presença de grupos funcionais polares, conferindo-a alto poder de solvatação (ROSSI et al., 2017).

Nossos estudos evidenciaram solidamente uma redução drástica na contribuição da vegetação nativa para a formação de substâncias húmicas (AH e HU) no bioma Cerrado e zona de Ecótono em profundidades abaixo de 0,20m. Essa característica é ainda mais potencializada pela agricultura e pecuária em manejos tradicionais. Isto posto, considerando que no bioma Amazônia há uma contribuição da vegetação nativa ao longo do perfil de 1,0 m de solo, é notório, que o manejo dos agrossistemas, sobretudo a agricultura, não pode ser semelhante ao adotado para o Cerrado e zona de Ecótono.

#### **4.5 Índices de manejo de carbono associado às frações químicas da matéria orgânica do solo**

Os elevados valores do GP do carbono verificados nas áreas de agricultura, decorrem possivelmente do revolvimento intenso e incorporação dos resíduos vegetais, onde ocorreu uma maior desagregação das partículas e a consequente aceleração no processo de mineralização da

matéria orgânica. Embora, o GP seja utilizado como indicativo de estágio de humificação dos resíduos orgânicos, valores elevados desse índice podem indicar baixa entrada permanente de material vegetal no sistema com capacidade de manter ou até mesmo elevar os estoques de COT (PETTER et al., 2017), fato este que corrobora os estoques de COT verificados no presente estudo.

Os menores valores de ICC nas áreas de agricultura e pastagem revelam baixa capacidade de aporte de carbono orgânico, refletindo em estoques reduzidos de COT, como de fato, verificado no presente trabalho. Esses dados evidenciam a ineficácia dos sistemas de manejo tradicionalmente utilizados na região em estudo para manutenção e/ou aumento dos estoques de carbono, cujo sistema se caracteriza principalmente pelo cultivo da soja em monocultura e/ou soja no verão e milho em segunda safra.

Valores de IMC >100 sinalizam manejo eficiente para a melhoria e/ou manutenção da qualidade do solo através do elevado aporte de material orgânico no solo (PETTER et al., 2017). Entretanto, a análise desse índice de maneira isolada pode levar a interpretações equivocadas, pois um maior valor de IMC pode estar mais relacionado com a labilidade do carbono do que propriamente seus estoques. No caso vertente, os valores próximos de labilidade do C nas áreas de pastagem e vegetação nativa contribuíram para um maior valor de IMC, compatível com a área de referência.

A labilidade representa a fração de C de fácil mineralização e, portanto, a deposição dos resíduos das folhas das pastagens associado à menor taxa de decomposição decorrente da ausência ou menor revolvimento do solo (MULLER et al., 2012; LEITE et al., 2013), pode ter contribuído para valores de labilidade próximos à vegetação nativa. Outro aspecto que merece destaque, é o fato de que a deposição dos resíduos nas áreas de pastagens é basicamente composta por folhas de gramíneas, estando ausente a deposição de resíduos altamente lignificados de alta relação C/N, como caules e galhos. Isso contribui para um aporte de material de fácil mineralização e, conseqüentemente maior labilidade.

#### **4.6 Estoques de carbono no sistema**

Os resultados demonstram que o impacto negativo da conversão de vegetação nativa para agricultura nos estoques de COT na Amazônia são significativamente mais expressivos, o que requer do produtor, a adoção de técnicas de manejo com especificidade para esse bioma visando a manutenção e/ou aumento dos estoques de COT em áreas agrícolas. Ademais, os impactos não ficam restritos à camada superficial, mas, a pelo menos 1,0m de profundidade, corroborando os resultados de BODDEY et al., (2010) e MIRANDA et al., (2016).

A dinâmica dos estoques de COT no solo são governados por interações complexas, que envolvem o uso do solo, vegetação, clima, características dos solos, localização geográfica (DAVY e KOEN, 2013; WAN et al., 2019; GOMES et al., 2019). A magnitude com que esses fatores exercem efeito sobre COT no solo pode se dar em escala global ou regional e em diferentes profundidades (MAYER et al., 2019; GOMES et al., 2019). Portanto, as alterações desses fatores podem resultar em alterações na comunidade vegetal, modificando aspectos morfofisiológicos como espessura e densidade do caule, área foliar, biomassa e altura das plantas (TAYEBI et al., 2021) e conseqüentemente resultar em microclimas que alteram as características intrínsecas do dossel. Isso explicaria em parte as maiores perdas de COT na Amazônia, onde, mesmo não havendo diferença de precipitação para o Cerrado, as condições de umidade no interior do dossel da vegetação amazônica proporcionariam umidade e atividade microbiana do solo significativamente superiores. A maior umidade do microclima, em tese, contribuiria significativamente para maiores taxas de atividade microbiana (respiração microbiana) e conseqüentemente maior emissão de C-CO<sub>2</sub>. Outro aspecto, é a própria deposição de resíduos, cujas métricas são significativamente maiores na Amazônia, portanto, com maior quantidade de substrato lábil para decomposição e mineralização, proporcionalmente maiores que os efluxos de C-CO<sub>2</sub>.

Nossos resultados corroboram os dados reportados por PETTER et al. (2017) quanto as perdas de C pela conversão da vegetação nativa em áreas agrícolas na Amazônia. Esses autores foram os primeiros a alertarem para maiores perdas proporcionais de C em áreas da Amazônia comparado ao Cerrado quando a vegetação nativa é convertida em sistemas agrícolas, e estes, manejados de forma inadequada. Assim como verificado no presente estudo, esses autores já reportavam a necessidade de implementação de manejo diferenciado do adotado no Cerrado para o sistema de cultivo soja e milho em segunda safra, cuja premissa básica, deve se sustentar em práticas que visam aportar significativamente maiores quantidades de carbono no sistema.

Deixamos claro que não estamos fazendo questionamento à conversão de vegetação nativa para áreas agrícolas na Amazônia, desde que, esta esteja em conformidade com a legislação ambiental. Assim como no trabalho de PETTER et al. (2017), estamos alertando para a necessidade de adoção de práticas de manejo diferenciadas para os sistemas e cultivo com soja e milho e/ou pastagem, cujo propósito é manter os estoques de COT compatíveis à vegetação nativa, ou na pior das hipóteses, muito próximos a esta.

Por fim, nossos dados trazem informações relevantes que justificam a propositura de ações diferenciadas de manejo. Por exemplo, é possível e necessário a implementação de

práticas de cultivo sob a égide da agricultura de baixo carbono e da teoria do carbono negativo, atendendo assim, aos principais pressupostos constante no plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono) proposto pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Governo Federal Brasileiro (BRASIL/MAPA, 2012). Este manejo diferenciado poderia ser ainda mais sustentáveis com a adoção de sistemas como a integração lavoura-pecuária-floresta e sistema de plantio direto.

## 5 CONCLUSÕES

Os dados gerados por esse estudo demonstram que a conversão de vegetação nativa para sistemas agrícolas, promovem redução nos estoques de COT e NT principalmente na camada de 0,10m.

Os estoques de COT diminuiram a uma taxa de 30%, 43%, 33%, ao longo de 1,0m nas áreas de agricultura nos Biomas Cerrado, Amazônia e no Ecótono respectivamente ao longo de um período de 20 a 30 anos após a conversão de vegetação nativa.

Nossos estudos revelam que a conversão de vegetação nativa para agricultura tem impacto negativo sob os estoques de COT, resultando em perdas na forma de C-CO<sub>2</sub> na proporção de 4,9; 2,5 e 9,8 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> ao longo de 1,0m, no Cerrado, na zona do Ecótono e no bioma Amazônia respectivamente.

Esses resultados evidenciam, que muitas vezes, o manejo adotado nas áreas agrícolas são insuficientes para a manutenção dos estoques de COT no solo, tornando-os ineficientes do ponto e vista agrônômico e ambiental.

Para mitigar as reduções progressivas dos estoques de carbono no solo, recomenda-se políticas agrícolas comuns que incentivem práticas que levem à redução do impacto das atividades agrícolas nos estoques de C, principalmente nas áreas de agricultura. Dentre as ferramentas que podem ser utilizadas por políticas públicas podemos destacar a adoção de sistemas de manejo mais sustentáveis, como a integração lavoura-pecuária-floresta, integração lavoura-pecuária e sistema de plantio direto, mostrando papel importância para manter e aumentar os estoques de carbono no solo com grande potencial de promover melhorias na qualidade do solo e da sustentabilidade agrícola. Além disso, é uma alternativa de recuperar os solos degradados e conservação do ambiente, com produção de forragem de qualidade que contribuam para o aporte de matéria orgânica solo, através das práticas da diversificação, rotação e consorciação de culturas, que o mantenham ecologicamente sustentável.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, E. J.; LUIZÃO, F.; RODRIGUES, D. d J. Produção de serapilheira em florestas intactas e exploradas seletivamente no sul da Amazônia em função da área basal da vegetação e da densidade de plantas. **Revista Acta Amazônica** v.45, n.2, 2015: 157 – 166. Disponível em Doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4392201402543>

BARBERA, A. C.; VYMAZAL, J.; MAUCIERI, C. Greenhouse Gases Formation and Emission. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. **Encyclopedia of Ecology**, 2nd Edition. Elsevier Inc, v. 2, p. 329-333, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10895-4>

BENITES, V.M., MADARI, B., MACHADO, P.L.O.A. Extração e Fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. Comunicado Técnico 16, **EMBRAPA Solos**, Rio de Janeiro. 7p. 2003.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R.M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 975-983, 2008.

BLAIR G J, LEFROY R D B, LISE L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**. 46: 1459-1466.

BLAKE, G.R., HARTGE, K.H., 1986. Bulk density. In: A (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods*. Part1. **American Society of Agronomy, Madison**, pp.363-375.

BODDEY R M, JANTALIA C P, CONCEICAO P C, ZANATTA J A, BAYER C, MIELNICZUK J, DIECKOW J, dos SANTOS H P, DENARDIN J E, AITA C, GIACOMINI S J, ALVES B J R, URQUIAGA S. 2010. Carbon accumulation at depth in ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**. 16: 784-795.

BONINI, I.; MARIMON-JÚNIOR, B.H.; MATRICARDI, E.; PHILLIPS, O.; PETTER, F.; OLIVEIRA, B.; MARIMON, B. S. Collapse of ecosystem carbon stocks due to forest conversion to soybean plantations at the Amazon-Cerrado transition. **Forest Ecology and Management**, v.414, p.64-73, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.038>

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. Tradução técnica: Igo Fernando Lepsch. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Bookman, 2013. 716p.

BRASIL/MAPA/ACS. 2012. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) MAPA/MDA/Coordenação da Casa Civil da Presidência da República. Brasília: 173p.

CAMPOS, L.P., CARVALHO LEITE, L.F., MACIEL, G.A., Brasil, E.L., Iwata, B.F., 2013. Stocks and fractions of organic carbon in an oxisol under different management systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 48, 304–312. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000300009>.

CANELLAS, L.P., SANTOS, G.A., 2005. Humusfera: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas. 310 UENF, Campos dos Goytacazes (ISBN: 85-905835-1-1).

CEPEMAR. Estudo ecológico rápido para a criação e implantação de unidade(s) de conservação do rio Ronuro. Cuiabá: CEPEMAR, 1998.

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

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade do feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 933-942, 2008.

CONAB (Brasil). Safras Grãos: série histórica. 2018. Disponível em: Acesso em: 10 de Junho 2021.

CUNHA, E. de Q.; STONE, L.F.; FERREIRA, E.P. de B.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J.A.A.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. ii - atributos biológicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.2, n.35, p. 603-611, 2011. Disponível em: Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200029>

DAVY, M.C.; KOEN, T.B. Variations in soil organic carbon for two soil types and six land uses in the Murray Catchment, New South Wales, Australia. **Soil Res.** 2013, 51, 631–644.

FAO 2017. **Carbone Organique du Sol: une richesse invisible**. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie.

FELIPE, V.S. Estoques de carbono orgânico total, carbono lábil e nitrogênio no solo em diferentes sistemas de uso da terra. 67f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de viçosa, 2016.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; CUNHA, T. J. F.; SALTON, J. C. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.5, p.847-853, 2006. Disponível em: Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000500018>

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II - Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.805-818, 2009.

GMACH, M. R.; DIAS, B. O.; SILVA, C.A; NÓBREGA, J. C. A.; LUSTOSA-FILHO, J. F.; SIQUEIRA-NETO, M. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v.14, 2018.

GOMES, L.C.; FARIA, R.M.; DE SOUZA, E.; VELOSO, G.V.; SCHAEFER, C.E.G.; FILHO, E.I.F. Modelling and mapping soil organic carbono stocks in Brazil. **Geoderma** 2019, 340, 337–350.

GOUGOULIAS, C., CLARK, J. M. & SHAW, L. J. 2014. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 94: 2362-2371.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA), 2020: As emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos setores de Energia e de Processos Industriais em 2019. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/as-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-em-2019-20201201>.

IWATA, B. F.; BRA DÃO, M. L. S. M.; BRAZ, R. S.; LEITE, L. F. C.; COSTA, M. C. G. Total and particulate contents and vertical stratification of organic carbon in agroforestry system in Caatinga. **Revista. Caatinga**, v. 34, n. 2, p. 443 – 451, 2021.

JÚNIOR, J.F. do V.; SOUZA, M.I.L. de.; NASCIMENTO, P. P. R. R. do.; CRUZ, D. L. de. Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. **Revista Agro ambiente**, v. 5, n. 2, p.158-165, 2011.

KURZ, W. A.; APPS, M. J. Developing Canada`s national forest carbono monitoring, accounting and reporting system to meet the reporting requirements of the Kyoto Protocol. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v.11, n.1, p.33-43, 2006.

LAL, R. Soil carbon sequestration in Latin America. In: Lal, R. et al(Ed). Carbon sequestration soils of Latin America. **New York: Food Products Press**, 2006. Cap.3.p.49-64.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1131-1140, 2007.

LEÃO, S. B. de S. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **ENGIE BRASIL. ECOFINANCE NEGÓCIOS**, 2019.

LEHMANN, J., M. SILVA CRAVO, AND W. ZECH (2001), Organic mat-ter stabilization in a Xanthic Ferralsol of the central Amazon as affected by single trees: Chemical characterization of density, aggregate, and particle size fractions, **Geoderma**, 99, 147-1 68.

LEITE, L. F. C.; ARRUBA, F. P. de.; COSTA, C. de. N.; FERREIRA, J. D. S.; HOLANDA NETO, M. R. 2013. Chemical quality of soil and dynamics of carbon under monoculture and intercropping of acrocomia palm and pasture. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 17: 1257-1263. Disponível em Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013001200002>.

LEITE, L. F. C.; GALVAO, S. R. S.; HOLANDA, NETO, M. R.; ARAUJO, F. S.; IWATA, B. F. 2010. Chemical attributes and Carbon stocks in na oxisol under no-tillage in savannah of piaui state. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 14: 1273-1280.

LEITE, L.F.C., MENDONÇA, E.S., MACHADO, P.L.O.A., MATOS, E.S., 2003. Total C and N storage and organic C pools of a Red-Yellow podzolic under conventional and no tillage at the Atlantic forest zone, South-eastern Brazil. **Aust. J. Soil Res.** 41, 717–730. <http://dx.doi.org/10.1071/SR02037>.

LIMA, C. E. P.; FONTENELLE, M. R.S; MADEIRA, N. R.; SILVA, J. DA; GUEDES, Í. M. R.; SILVA, L. R. B.; SOARES, D. C. Compartimentos de carbono orgânico em Latossolo cultivado com hortaliças sob diferentes manejos. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v.51, n.4, abr. 2016.

- MACHADO, P. L. O. D.A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova** v. 28, p. 329-334, 2005.
- MATOS, N. M.; RIBEIRO, F. P.; GATTO, A.; BUSSINGUER, A. P. (2017) Estoque de Serapilheira em Três Fisionomias no Cerrado do Distrito Federal. **Floresta e Ambiente**, v.24, p.1-9. Disponível em Doi: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.126215>
- MAYER, S.; KÜHNEL, A.; BURMEISTER, J.; KÖGEL-KNABNER, I.; WIESMEIER, M. Controlling factors of organic carbon stocks in agricultural topsoils and subsoils of Bavaria. **Soil Tillage Res.** 2019, 192, 22–32.
- MEUER, E. J. Fundamentos de química do solo. Porto Alegre: Evangraf, 2006, 285p.
- Miranda, E.; Carmo, J.; Couto, E.; Camargo, P. Long-term changes in soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado under commercial soybean. **Land Degradation and Development**, v.27, p.1586-1594, 2016. <https://doi.org/10.1002/ldr.2473>.
- MIRANDA, E.; CARMO, J.; COUTO, E.; CAMARGO, P. Long-term changes in soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado under commercial soybean. **Land Degradation & Development**. V. 27, p.1586-1594, 2016.
- MUELLER, C.B.; dos SANTOS WEBER, O.L.; SCARAMUZZA, J. F. 2012. Oxidizable fraction of organic carbon in na argisol under diferente land use systems. *Cerne*. 18: 215-222.
- NANZER, M. C. et al. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, n. 18, p. 136- 145, 2019.
- PAIVA, A. O. & FARIA, G. E. Estoque de carbono do solo sob cerrado sensu stricto no Distrito Federal, Brasil. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**. v.1, n. 1, p. 59, 2007.
- PAUSTIAN, K., LEHMANN, J., OGLE, S., REAY, D., ROBERTSON, G. P. & SMITH, P. 2016. **Climate smart soils**. *Nature*, 532(7597): 49-57. doi:10.1038/nature17174.
- PETTER, FA, DE LIMA, LB, DE MORAIS, LA, TAVANTI, RFR, NUNES, ME, DA SILVA FREDDI, O., & MARIMON, B. H. (2017). Estoque de carbono em latossolos sob agricultura e floresta no sul da Amazônia do Brasil. **Geoderma Regional**, 11, 53-61. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.09.001>
- POEPLAU, C., ARONSSON, H., MYRBECK, Å., & KÄTTERER, T. (2015). Effect of perennial ryegrass cover crop on soil organic carbon stocks in southern Sweden. **Geoderma Regional**, 4, 126-133.
- RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A.; GUIMARÃES, P.T.G.; GUILHERMES, L.R.G. Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, 32:429-437, 2008.
- RENATA, M. S.; MARIA, A. P. P.; NILTON de S. S.; VINÍCIUS, X. Soil organic carbon in no-tillage systems of different ages in Southwest Mato Grosso, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.25, n.4, p.250-255, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p3-9>

RIBEIRO, B. T.; LIMA, J. M. de.; CURI, N.; OLIVEIRA, G. C. de.; LIMA, P. L. T. Cargas superficiais da fração argila de solos influenciadas pela vinhaça e fósforo. **Quim. Nova**, v.34, n.1, p.5-10, 2011.

ROSSI, C.Q.; PEREIRA, M. G.; GIACOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia, Campinas**, v. 70, n. 3, p.622-630, 2011. Disponível em Doi: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000300018>

SALES, M. C. G.; CAMPOS, M. C. C.; MARTINS, T. S.; FILHO, E. D. B. de.; PINHEIRO, E. N.; CUNHA, J. M. de.; FRAGA, V. S. da.; SOUZA, F. G. de. Litter input in cerrado, cerradão and forest environments in Amazon, Brazil. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.** Recife, v.15, n.2, p.7383, 2020.

SANTOS, A. dos.; MATOS, E. S. da.; FREDDIA, O. S. da.; GALBIERI, R.; LALD, R. Cotton production systems in the Brazilian Cerrado: The impact of soil attributes on field-scale yield. **European Journal of Agronomy** v.118 ,2020.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; PEDROSA, M. E. R. Características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semiárido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.217–225, 2009.

SANTOS, U. J.; DUDA, G. P.; MARQUES, M. C.; MEDEIROS, E. V.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S.; BROSSARD, M.; HAMMECKER, C. Soil organic carbono fractions and humic substances are affected by land uses of Caatinga forest in brazil, **Aride Land Research and Management**, Doi: 10.1080/15324982.2018.1555871, 2019.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. DE S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.31-40, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100004>

SILVA, N. M. DA.; BATISTELLA, A. M.; COELHO, A. M. M; KUROYANAGI, V. L. N. Monitoramento do desmatamento e pontos quentes na zona tampão da Estação Ecológica do Estado de Rio Ronuro, Nova Ubiratã, Mato Grosso. Mato Grosso, 2009. v. 6, n. 2, p. 484-491.

SILVA, V. da.; MOTTA, A. C. V.; MELO, V. F. de.; LIMA, V. C. Variáveis de acidez em função da mineralogia da fração argila do solo. **Revista Brasileira. Ciência. Solo** v.32 n.2, p. :551-559, 2008. Disponível em Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200010>

SINGH, A. K.; KUSHWAHA, M.; RAI, A.; SIMGH, N. Changes in soil microbial response across year following a wildfire in tropical dry forest. **Forest Ecology and Management**, v.391, p.458-468, 2017.

SMITH, P. **Soils and climate change**. Current Opinion in Environmental Sustainability, v. 4, n. 5, p. 539-544, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.005>

SPARKS, D.L. Elucidating the fundamental chemistry of soils: Past and recent achievements and future frontiers. **Geoderma**, v.100, p.303-319, 2001.

SPARKS, D.L. Environmental soil chemistry. California: **Academic Press**, 1995. 267 p.

SUGIHARA, S.; FUNAKAWA, S.; KILASARA, M.; KOSAKI, T. Effects land management on CO<sub>2</sub> flux and soil C stock in two Tanzanian croplands with contrasting soil texture. **Soil Biology and Biochemistry**, **Elmsford**, v. 46, p.1-9, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.013>.

TAYEBI, A.; ROSAS, J. T. F.; MENDES, W. de S.; POPPIEL, R. R.; OSTOVARI, Y.; RUIZ, L. F. C.; DOS SANTOS, N. V.; CERRI, C. E. P.; Silva, S. H. G.; Curi, N.; Silvero, N. E. Q.; Demattê, J. A. M. Drivers of Organic Carbon Stocks in Different LULC History and Along Soil Depth for a 30 Years Image Time Series. **Remote Sens.** 2021, *13*(11), 2223; <https://doi.org/10.3390/rs13112223>

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.108, n. 50, p. 20260-20264, 2011. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>.

VALADÃO, M. B. X.; JUNIOR, B. H. M.; BIANCA DE OLIVEIRA, B. de.; LÚCIO, N. W.; SOUZA, M. G. R. das.; MARIMON, B. S. Hiperdinâmica da biomassa como modulador-chave para a automanutenção de floresta sobre solo distrófico na transição Amazônia-Cerrado. **Sci. For**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 475-485, jun. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n110.20>.

VENDRAME, P. R. S.; MARCHÃO, R. L.; BRITO, O. R.; MARTINS, E. S. de.; BECQUER, T. Predição da Granulometria e Mineralogia de Latossolos do Cerrado Utilizando Espectroscopia de Infravermelho Próximo. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 326, EMBRAPA 2015**.

VILLARINO, S. H.; STUDDERT, G. A.; LATERRA, P. Greenhouse gas inventories: Deriving soil organic carbono change factors and assessing soil depth relevance in Argentinean Semiarid Chaco. **Catena**, v. 169, p. 164-174, 2018.

WAN, Q.; ZHU, G.; GUO, H.; ZHANG, Y.; PAN, H.; YONG, L.; MA, H. Influence of Vegetation Coverage and Climate Environment on Soil Organic Carbon in the Qilian Mountains. **Sci. Rep.** 2019, 9, 17623.