

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS MARECHAL CÂNDIDO RONDON**

CARLOS AUGUSTO ROCHA DE MORAES REGO

**ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS EDÁFICOS, NOS ESTOQUES DE CARBONO E
NITROGÊNIO E NAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA APÓS
SUBSTITUIÇÃO DA VEGETAÇÃO NATURAL POR PASTAGENS NA AMAZÔNIA
MARANHENSE**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2021

CARLOS AUGUSTO ROCHA DE MORAES REGO

**ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS EDÁFICOS, NOS ESTOQUES DE CARBONO E
NITROGÊNIO E NAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA APÓS
SUBSTITUIÇÃO DA VEGETAÇÃO NATURAL POR PASTAGENS NA AMAZÔNIA
MARANHENSE**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

Orientador: Dr. Paulo Sérgio Rabello de Oliveira.

Coorientador: Dr. Luciano Cavalcante Muniz

Linha de pesquisa: Sistemas de Produção Vegetal Sustentáveis

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2021

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste

Rocha de Moraes Rego, Carlos Augusto

Alterações nos atributos edáficos, nos estoques de carbono e nitrogênio e nas frações da matéria orgânica após substituição da vegetação natural por pastagens na Amazônia Maranhense / Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego; orientador Paulo Sérgio Rabello de Oliveira; coorientador Luciano Cavalcante Muniz. - Marechal Cândido Rondon, 2021.

96 p.

Tese (Doutorado Campus de Marechal Cândido Rondon) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2021.

1. Amazônia Legal. 2. Conservação do solo. 3. Manejo do solo. 4. Matéria orgânica do solo. I. Rabello de Oliveira, Paulo Sérgio, orient. II. Cavalcante Muniz, Luciano, coorient. III. Título.



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



PARANÁ
GOVERNO DO ESTADO

CARLOS AUGUSTO ROCHA DE MORAES RÉGO

Alterações nos atributos edáficos, nos estoques de carbono e nitrogênio e nas frações da matéria orgânica após substituição da vegetação natural por pastagens na Amazônia Maranhense

Tese apresentada à distância, de forma síncrona e por videoconferência, conforme Resolução nº 052/2020 – CEPE, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal, linha de pesquisa Sistemas de Produção Vegetal Sustentáveis, APROVADO pela seguinte banca examinadora:

Orientador - Paulo Sérgio Rabello de Oliveira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

Edleusa Pereira Seidel

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

Maria do Carmo Lana

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

Jean Sérgio Rosset

Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS)

Alfredo Richart

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - Toledo (PUC-Toledo)

Neumarcio Vilanova da Costa
Coordenador Especial do Programa de Pós-Graduação em Agronomia

Marechal Cândido Rondon, 21 de dezembro de 2021

*A minha família e aos amigos que sempre
acreditaram em mim, mesmo quando pensei
que não poderia*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelas iluminações proporcionadas nos momentos difíceis e que me fizeram mais forte e focado em finalizar essa etapa da minha caminhada acadêmica.

Aos membros da minha família Ligia Rocha de Moraes Rego, Carlos José de Moraes Rego, Gabriel Victor Rocha de Moraes Rego e Ismael Felipe Rocha de Moraes Rego pelo apoio durante toda a minha vida pessoal e acadêmica.

À Bruna Penha Costa que esteve ao meu lado, proporcionando apoio e incentivo em todos os momentos alegres e tristes.

Reitero meus agradecimentos aos companheiros de graduação que contribuíram para essa etapa, em especial, a José Ahirton Lopes e José Eduardo Costa de Freitas, por terem sido exemplos acadêmicos e principais incentivadores para meu aprimoramento para alcançar melhores níveis educacionais e incentivos à vida de pesquisador.

Aos meu orientador Dr. Paulo Sérgio Rabello de Oliveira e coorientador Dr. Luciano Cavalcante Muniz que contribuíram para a realização deste trabalho, por todos os ensinamentos, pela dedicação e pela confiança depositada em mim e no meu trabalho, serei eternamente grato.

Aos professores que contribuíram tirando minhas dúvidas e fornecendo esclarecimentos durante os procedimentos analíticos e estatísticos, em especial ao Dr. Jean Sérgio Rosset e Dr. Edmar Soares de Vasconcelos.

Aos integrantes do grupo “GEPSIA” que nesta etapa foram fundamentais para a execução das análises, em especial a Eloisa Mattei, Marinez Carpiski Sampaio e Lucas da Silveira.

Aos integrantes do grupo “GINTEGRA” que colaboraram ativamente na coleta das amostras e realização de análises, fundamentais para a exceção deste trabalho, em especial ao Vitor Roberto Ribeiro Reis, Caio Vinicius Sales Pereira da Macena, Tharcisio Campos Coelho, Maycon Pedrosa Cardoso, Ramon da Silva Batista.

Aos amigos que fiz durante a pós-graduação, em especial a Maria Soraia Fortado Vera Cruz, Thatiane Nepomuceno Alves e Pablo Wenderson Ribeiro Coutinho, que durante essa caminhada foram pessoas que contribuíram para os momentos de lazer e descontração.

Aos funcionários e professores da Universidade Estadual do Oeste do Paraná por terem contribuído em momentos oportunos e dedicando esforços para que o trabalho pudesse ser conduzido da melhor forma possível.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Agronomia (PPGA) pela oportunidade de realização do Doutorado.

Um especial agradecimento ao Professor Dr. Juan Lopez de Herrera da Universidade Politécnica de Madrid pelos anos de contribuição na elaboração de diversos trabalhos e tradução dos mesmos.

Aos membros da banca de defesa que contribuíram para a melhoria desse trabalho, Dra. Maria do Carmo Lana, Dra. Edleusa Pereira Seidel, Dr. Paulo Sérgio Rabello de Oliveira, Dr. Jean Sérgio Rosset, Dr. Alfredo Richart, pela disponibilidade e apontamentos realizados que engrandeceram a melhoria desse estudo.

À secretária do PPGA Leila Dirlene Allievi Werlang pela paciência e dedicação ao realizar seu trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

*“Plante seu jardim e decore sua alma, em vez
de esperar que alguém lhe traga flores”*

William Shakespeare

RESUMO

MORAES REGO, Carlos Augusto Rocha de, Doutorando, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Dezembro, 2021. **Alterações nos atributos edáficos, nos estoques de carbono e nitrogênio e nas frações da matéria orgânica após substituição da vegetação natural por pastagens na Amazônia Maranhense.** Orientador: Dr. Paulo Sérgio Rabello de Oliveira. Coorientador: Luciano Cavalcante Muniz

A conversão de áreas nativas para exploração com pecuária de corte extensiva é comum no território brasileiro. No estado do Maranhão, devido ao baixo nível tecnológico dos produtores, o emprego do fogo para preparo das áreas e das características edafoclimáticas tem sofrido modificações danosas ao ambiente edáfico. Esse trabalho teve como objetivo avaliar as modificações nos atributos químicos, físicos, biológicos e as formas de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo em Plintossolo Argilúvico da região de Amazônia Maranhense ocasionada pela substituição da vegetação natural por pastagens e a recuperação destas com diferentes. Foram avaliados os seguintes manejos: Floresta secundária (FS), Pastagem perene (PP), Pastagem recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) e Pastagem recuperada e formada há oito anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). As variáveis avaliadas foram os atributos físicos: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência a penetração (Rp) e umidade do solo (Ug); os atributos biológicos: teor de C da biomassa microbiana, respiração basal, quociente metabólico e quociente microbiano), e os atributos químicos: pH, H+Al, Al³⁺, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, MO, SB, CTC, V, carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), estoques de C e N, carbono e nitrogênio elementar (CT e NT), abundância dos isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, frações oxidáveis (F1, F2, F3 e F4), substâncias húmicas (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos, húmica), frações físicas granulométricas (C e N particulado (COP e NOP) e associado aos minerais (COAM e NOAM)) e o índice de manejo de carbono (IMC) na camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. As áreas de FS e P8 apresentaram as maiores contribuições da camada superficial sobre os teores de MO e junto com a PP sobre o complexo sortivo do solo. Para os atributos físicos e biológicos, as áreas FS e P8 proporcionaram impactos positivos na melhoria desses parâmetros. A substituição da floresta secundária para ambiente de pastagem perene resultou em alterações dos teores de C e N do solo, frações granulométricas da MOS e IMC. Os maiores teores de C das substâncias húmicas foram observados na FS em superfície, assim como pelas áreas P8 e P5, enquanto em profundidade as áreas P8 e P5 apresentam as maiores contribuições. Em relação às frações oxidáveis, foram verificadas na área P8 as maiores contribuições dentro das frações F1 e F3

diferindo das demais, em parte das camadas analisadas. Ao longo do perfil a área P8 apresentou os maiores teores de C e N totais. Em relação aos estoques de C e N foi observado que as áreas P8 e PP apresentaram os maiores valores quando comparados à FS. Pela abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ foi possível observar na área PP o maior enriquecimento, P5 e P8 comportamento intermediário e na FS o menor enriquecimento, enquanto para $\delta^{15}\text{N}$ não houveram diferenças. A recuperação da pastagem há oito anos apresentou resultados superiores à pastagem perene e a floresta, contribuindo para a capacidade de melhoria de estocagem de C e N do solo, com melhores resultados sobre os atributos do solo proporcionados pelas características inerentes ao sistema radicular das forrageiras *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

Palavras-chave: Amazônia Legal, Carbono orgânico total, Manejo do solo, Nitrogênio total, Plintossolos.

ABSTRACT

MORAES REGO, Carlos Augusto Rocha de, Doctor degree, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, December, 2021. **Changes in edaphic attributes, carbon and nitrogen stocks, and organic matter fractions after replacement of natural vegetation by grassland in the Maranhense Amazon.** Advisor: Dr. Paulo Sérgio Rabello de Oliveira. Co-advisor: Luciano Cavalcante Muniz.

The conversion of native areas for exploitation with extensive beef cattle is common in Brazil. In the state of Maranhão, due to the low technological level of the producers, the use of fire to prepare the areas and the edaphoclimatic characteristics have suffered harmful changes to the edaphic environment. This study aimed to evaluate the changes in chemical, physical, biological attributes and the forms of carbon (C) and nitrogen (N) in the soil in Argiluvic Plintosol in the region of Amazônia Maranhense, caused by the replacement of natural vegetation by grasslands and the recovery of these with different. The following managements were assessed: Secondary Forest (SF), Grassland (PP), Grassland recovered and formed five years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) and Grassland recovered and formed eight years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). The variables evaluated were the physical attributes: soil density (Ds), total porosity (Pt), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), penetration resistance (Rp) and soil moisture (Ug); the biological attributes: C content of microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and microbial quotient), and chemical attributes: pH, H+Al, Al³⁺, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, OM, SB, CTC, V, carbon total organic matter (TOC), total nitrogen (TN), stocks of C and N, carbon and elemental nitrogen (CT and NT), abundance of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isotopes, oxidizable fractions (F1, F2, F3 and F4), humic substances (fulvic acids, humic acids, humin), granulometric physical fractions (particulate C and N (POC and PON) and associated with minerals (AMOC and AMON)) and the carbon management index (CMI) in the layers of 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30 and 0.30-0.40 m. The FS and P8 areas showed the greatest contributions of the surface layer on the OM contents and together with the PP on the soil sorption complex. For the physical and biological attributes, the FS and P8 areas provided positive impacts in the improvement of these parameters. The replacement of the secondary forest for an environment of perennial grassland resulted in alterations of the C and N contents of the soil, granulometric fractions of SOM and CMI. The highest C contents of the humic substances were observed in the FS on the surface, as well as in the areas P8 and P5, while in depth the areas P8 and P5 present the greatest contributions. In relation to the oxidizable fractions, the greatest contributions within the F1 and F3 fractions were verified in the P8 area,

differing from the others, in part of the analyzed layers. Along the profile, the P8 area showed the highest levels of total C and N. Regarding C and N stocks, it was observed that the P8 and PP areas presented the highest values when compared to FS. Due to the natural abundance of $\delta^{13}\text{C}$, it was possible to observe the highest enrichment in the PP area, P5 and P8 intermediate behavior and in the FS the lowest enrichment, while for $\delta^{15}\text{N}$ there were no differences. Grassland recovery eight years ago showed better results than perennial grassland and forest, contributing to the capacity to improve soil C and N storage, with better results on soil attributes provided by the characteristics inherent to the root system of the plants forages *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

Keywords: Legal Amazon, Total organic carbon, Soil management, Total nitrogen, Plinthosols.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	1
2	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	8
3	CAPÍTULO I - ALTERAÇÕES EM ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E BIOLÓGICOS EM SOLO COM PASTAGENS RECUPERADAS PELA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NA AMAZÔNIA MARANHENSE	14
3.1	RESUMO	14
3.2	INTRODUÇÃO	16
3.3	MATERIAL E MÉTODOS	17
3.3.1	Local de Estudo	17
3.3.2	Sistemas Avaliados e Históricos de Uso	18
3.3.3	Coleta das Amostras de Solo e Avaliações	19
3.3.4	Análise Estatística	21
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
3.5	CONCLUSÃO	28
3.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
4	CAPÍTULO II - CARBONO, NITROGÊNIO E FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA EM PASTAGENS RECUPERADAS NA AMAZÔNIA MARANHENSE	32
4.1	RESUMO	32
4.2	INTRODUÇÃO	34
4.3	MATERIAL E MÉTODOS	35
4.3.1	Local de Estudo	35
4.3.2	Sistemas Avaliados e Históricos de Uso	35
4.3.3	Coleta das Amostras de Solo e Avaliações	35
4.3.4	Análise Estatística	37
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.5	CONCLUSÕES	44
4.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
5	CAPÍTULO III - SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E FRAÇÕES OXIDÁVEIS DA MATÉRIA ORGÂNICA EM DIFERENTES AMBIENTES NA AMAZÔNIA MARANHENSE	49
5.1	RESUMO	49
5.2	INTRODUÇÃO	51
5.3	MATERIAL E MÉTODOS	52

5.3.1	Local de Estudo	52
5.3.2	Sistemas Avaliados e Históricos de Uso	52
5.3.3	Coleta das Amostras de Solo e Avaliações	52
5.3.4	Análise Estatística	54
5.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.5	CONCLUSÕES	62
5.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
6	CAPÍTULO IV - QUAIS OS IMPACTOS CAUSADOS PELA REMOÇÃO DA VEGETAÇÃO NATURAL NOS TEORES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM PLINTOSSOLO NA AMAZÔNIA MARANHENSE?	66
6.1	RESUMO	66
6.2	INTRODUÇÃO	68
6.3	MATERIAL E MÉTODOS	69
6.3.1	Local de estudo	69
6.3.2	Sistemas Avaliados e Históricos de Uso	69
6.3.3	Coleta das Amostras de Solo e Avaliações	69
6.3.4	Análise estatística	71
6.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
6.5	CONCLUSÕES	77
6.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82

1 INTRODUÇÃO GERAL

O bioma Amazônia é a maior região de biodiversidade do planeta, abrangendo 6,74 milhões de km² e estendendo-se por nove países: Brasil, Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela (BENCHIMOL, 2011). Neste bioma encontrar-se diversos ecossistemas que envolvem a maior floresta tropical do mundo, a floresta amazônica, e o Brasil tem papel de destaque por apresentar 60% dessa área dentro do seu território, estando distribuída na região denominada Amazônia Legal com 5.015.068,18 km², o que equivale a 58,9% do território nacional (IBGE, 2021).

A região da Amazônia Legal foi criada em 1953 para fins de planejamento político e compreende integralmente os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins e, parcialmente, o Maranhão (IBGE, 2021). No Estado do Maranhão a Floresta Amazônica originalmente compreendia 81.208,40 km², presente em 62 municípios do estado, prolongando-se em parte do Rio Gurupi, na cidades de Carutapera chegando em São Luís, passando por Santa Inês, Formosa da Barra Negra e Carolina, entretanto devido ao desmatamento, encontram-se de 25 a 24% desse total (CELENTANO et al., 2017; SILVA JÚNIOR et al., 2020; INPE, 2020). Além disso, o Maranhão vem apresentando taxa acumulada de desmatamento de 1988 a 2020 de 25.753 km², ficando em quinto lugar entre os estados que mais desmataram a área da floresta na região da Amazônia legal (INPE, 2020).

O desmatamento da floresta no Estado do Maranhão é advinda da expansão da pecuária de corte desenvolvida rapidamente a partir de meados da década de 1960, com a abertura de importantes rodovias e ao apoio de políticas públicas de incentivos fiscais para a produção de alimentos (MESQUITA, 2007; SILVA et al., 2019). Atualmente, vem tornando-se parte da nova fronteira agrícola do país, sendo um fato que Amazônia Maranhense tem sido historicamente convertida em extensas áreas de pecuária, plantio de soja e eucalipto (SILVA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021a; SANTOS et al., 2021).

A conversão de áreas nativa para exploração de pecuária de corte extensiva é comum no território brasileiro, em especial no bioma Amazônico, a qual tem proporcionado problemas quanto a degradação do solo pela falta de manejo apropriado e o uso sucessivo do fogo, a fim de controlar a regeneração natural, renovação ou recuperação da pastagem e adição de nutrientes ao solo, oriundos do material vegetal queimado (DIAS-FILHO, 2014; REIS et al., 2018a). Além disso, os principais entraves para melhorar essa situação seriam o baixo nível tecnológico dos produtores e prática recorrente de corte e queima, a principal operação de

preparo inicial da área para posterior implantação de cultivos agroalimentares (milho, feijão, arroz e mandioca) e pastagens (MOURA, 2006).

A curto prazo, esse modelo de abertura na região com emprego do fogo desempenha papel fundamental, diminuindo custos para o preparo inicial e fertilização do solo graças às expressivas quantidades de nutrientes que são depositadas em razão das cinzas sobre o solo (ARAÚJO et al., 2011). No entanto, a longo prazo, temos perdas da qualidade do solo ocasionado impactos negativos sobre os atributos edáficos, como a mudanças no ciclo de deposição, acúmulo e qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) e diminuição da capacidade produtiva do solo dependendo do sistema de manejo adotado (RODRIGUES et al., 2017; DURIGAN et al., 2017; REIS et al., 2018b).

Além disso, as condições climáticas da região apresentam períodos de altos índices pluviométricos e temperaturas elevadas durante todo o ano (MARANHÃO, 2013), com solos em sua grande maioria de baixa fertilidade natural e em torno de 60% derivados de rochas sedimentares detríticas (AGUIAR et al., 2010). Assim como, apresentando textura variando de franca a arenosa com altas percentagens de areia fina, teores de silte entre 15 e 20%, e baixos teores de argila variando entre 10 e 15%, altamente intemperizados, com baixa capacidade de retenção de cátions (MOURA et al., 2008), por conta disso, o uso agrícola inadequado tem causado impactos negativos sobre o solo.

Entre as principais classes de solo comumente encontradas no Maranhão, tem-se os Latossolos (33,87%), Argissolos (25,41%) e Plintossolos (14,60%) (MARANHÃO et al., 2013). Embora os Plintossolos sejam o terceiro solo de maior predominância no estado é uma classe bem comum nos trópicos úmidos, em especial na bacia Amazônica, no entanto pesquisas sobre impactos dos manejos nesse tipo de solos são escassos (BASTOS et al., 2021). A estrutura frágil e drenagem interna neste tipo de solo, assim como, o manejo de corte e queima tendem a provocar degradação dos atributos físicas, química e biológica do solo, acarretando uma série de prejuízos ao meio ambiente como aumento nas emissões de gases do efeito estufa, degradação, erosão e eliminação de espécies nativas com potencial econômico (MOURA, 2006; MARANHÃO, 2013; SANTOS et al., 2018; MOURA et al., 2018; CORRÊA-MARTINS et al., 2019).

Na região da Amazônia Maranhense os estudos em relação a mudança da cobertura vegetal por ambientes agrícolas e suas influências sobre os atributos físicos, químicos e biológicos e dinâmica da MOS são incipientes, podendo destacar Santos et al. (2018), que avaliando os teores e estoques do carbono orgânico total (COT), atributos químicos e físicos não observaram diferenças entre as áreas de pastagem, cultivo itinerante, pousio misto e floresta

secundária, com exceção na densidade do solo em superfície (0,0-0,10 m), sendo observado diferenças na pastagem que apresentou valor superior ao cultivo itinerante mas não diferindo das demais.

Reis et al. (2018a; 2018b), na região da Amazônia Maranhense avaliando os teores e estoques de COT e a fertilidade do solo não observaram diferenças entre áreas de pastagem degradada, integração lavoura-pecuária-floresta, floresta secundária e capoeira para os teores e estoques de COT e os melhores resultados observados para fertilidade foram encontrados dentro da pastagem degradada e integração lavoura-pecuária-floresta.

Celentano et al. (2020), avaliando o impacto de sistemas agroflorestais em relação a sucessão natural, como alternativa de mitigação para recuperação de solos degradados, melhorias das condições edáficas e aumento da ciclagem de nutrientes, não observaram incrementos nos teores de COT no solo, embora encontraram diferenças na quantidade de carbono fixado pelas plantas acima do solo.

Estudos sobre os impactos da conversão de floresta por pastagem e sua influência sobre a qualidade do solo é um componente chave para a avaliação da sustentabilidade ambiental, e para entender os efeitos do uso da terra os diferentes atributos do solo têm sido empregados na literatura a fim de verificar essas mudanças e o grau das mesmas (CHERUBIN et al., 2015). Portanto, o entendimento das modificações causadas pela conversão de áreas naturais por sistemas agrícolas pode fornecer informações para o emprego de técnicas ou práticas que permitam a conservação do solo, além de incrementos sobre os sistemas produtivos, garantindo a sustentabilidade e a conservação do agroecossistema (FREITAS et al., 2014), uma vez que a sustentabilidade está ligada diretamente à qualidade do solo, a qual implica na compreensão desse recurso como um sistema vivo e dinâmico.

Ao analisar a variação dos atributos é possível estabelecer para a região estudada propostas sustentáveis de manejo que visem à sustentabilidade do sistema (BEHERA; SHUKLA, 2014). No entanto, essa tarefa é complexa e deve ser realizada a partir de conjuntos de indicadores que possam ser reproduzíveis de maneira eficaz, em virtude que a verificação isolada não é suficiente para explicar a perda ou o ganho potencial ocorrido (MELO et al., 2017).

O tema qualidade do solo está amplamente discutido na literatura científica, principalmente no que diz respeito à sua definição e aos possíveis conjuntos de variáveis que podem ser empregadas para mensurá-la, levando em consideração a diversidade de solos e seus atributos (MELO et al., 2017; ROSSET et al., 2019; ALMEIDA et al., 2020). Dentre essas variáveis a variação dos teores de carbono orgânico do solo tem demonstrado grande atuação e

alta sensibilidade a influência dos diferentes manejos, a qual é sabido que têm influência sobre os atributos químicos, físicos e biológicos do solo (MELO, 2017; ROSA et al., 2017).

A MOS é importante indicador da atuação do sistema de manejo sobre o solo, interagindo diretamente sobre os diferentes atributos e seu incremento é impulsionado pela constante adição de resíduos orgânicos de várias naturezas e a contínua transformação destes (KLOSTER et al., 2016). Seu aumento possibilita melhorias sobre a infiltração e retenção de água, estruturação e menor susceptibilidade à erosão, melhoria sobre o conteúdo e ciclagem de nutrientes, aumento da capacidade de troca de cátions, complexação de elementos tóxicos e estimulação da macro e microbiota edáfica (COSTA et al., 2013), além de ser um dos maiores reservatórios de carbono (C) e nitrogênio (N) terrestre.

A MOS é constituída por todas as substâncias orgânicas carbonadas, a qual o C representa cerca de 40 a 60% de sua composição, além de outros elementos como o N (2 a 5%), fósforo (1%) e enxofre (1%) em menores proporções (COSTA et al., 2013; CUNHA et al., 2015; KLOSTER et al., 2016). Esta é resultante de um sistema complexo de substâncias cuja dinâmica é governada pelo aporte de resíduos orgânicos, de diversas naturezas, e por transformações contínuas através de fatores biológicos, químicos e físicos (CUNHA et al., 2015; KLOSTER et al., 2016). Além de desempenhar diversas funções no ambiente, a qual sua perda pode interferir drasticamente nos demais componentes do solo provocando desequilíbrio e é ponto de partida para a processo de degradação edáfica (ROSCOE et al., 2006; CUNHA et al., 2015).

Embora a MOS seja um importante indicador da qualidade e produtividade do solo, sua medição em relação aos teores totais de C e N por si só pode não refletir adequadamente as mudanças no solo (HAGHVERDI et al., 2020). Diante disso, a medições de frações ativas da matéria orgânica, como as substâncias húmicas (IHSS, 2020), particuladas (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; HAGHVERDI et al., 2020), oxidáveis (CHAN et al., 2001; SONG et al., 2021) e outras, podem ser instrumentos de maior acurácia e refletem as mudanças dinâmicas em curto e longo prazo baseada na capacidade de mudança rápida das formas C e N. O emprego dessas técnicas de fracionamento tem como objetivo separar diferentes frações de natureza, dinâmica e funções diversas que podem ser utilizadas para verificar a influência dos sistemas de manejo e da sua sustentabilidade sobre o solo, demonstrando a heterogeneidade dos diferentes sistemas de manejos (ASSUNÇÃO et al., 2018; NANZER et al., 2019; MOSIER et al., 2021).

As técnicas de fracionamento possibilitam a realização de estudos mais detalhados do conteúdo de C e N em seus diversos compartimentos, bem como sua relação com o manejo,

visando assim elaborar estratégias para utilização sustentável do solo, minimizando o impacto da atividade agropecuária e permitindo melhor entendimento de sua dinâmica (SILVA et al., 2018; GUARESCHI et al., 2018).

Pelas diferentes técnicas de fracionamento tem-se a obtenção de diferentes formas lábeis e recalcitrantes do C e N, implicando no entendimento de sua permanência no solo. Cambardella e Elliott (1992), por exemplo, idealizaram o fracionamento físico granulométrico, que tem como princípios quantificar esses elementos quando associados aos minerais do solo, sendo divididos em associado à fração areia e aos minerais, silte e argila. Quando associada a areia é conhecida como fração partícula é representa a forma lábil, obtido a partir da separação física das partículas orgânicas maiores que 53 μm , pois representar os resíduos recém incorporados ao solo, em diferentes graus de decomposição e, portanto, de alta labilidade apresentando alta taxa de reciclagem devido aos constituintes orgânicos (lipídios, proteínas, aminoácidos, exsudados radiculares, etc.) (CONCEIÇÃO et al., 2014; BELTRÁN et al., 2018). Já a parte associada às partículas menores que 53 μm , representa a fração de maior recalcitrância, pois estão associadas e protegidas pelos colóides minerais por fortes ligações químicas e com isso tem baixa ação dos microorganismos e grande permanência no solo (CONCEIÇÃO et al., 2014; BELTRÁN, et al., 2018; OZÓRIO et al., 2020).

Outra importante técnica de fracionamento seria as substâncias húmicas, na qual são as principais constituintes da matéria orgânica (entre 70 a 90%), sendo formada por diferentes vias de polimerização e condensação pela decomposição e degradação de diferentes compostos (lignina, polissacarídeos, proteínas, entre muitos outros) gerando moléculas grandes e estáveis que apresentam diversas cadeias carbônicas como os grupos: carboxílicos, fenólicos, benzóicos e alifáticos (ROSSET et al., 2016; MENDONÇA; MATOS et al., 2017; MAHLER et al., 2021).

Segundo a Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS, 2020), as substâncias húmicas são um complexo de materiais heterogêneos que passam por diferentes processos de transformação formando biomoléculas ativas que têm ação direta sobre a disponibilidade de nutrientes e preservação de compostos dependendo do grau de humificação do mesmo (MAHLER et al., 2021). Estas podem ser separadas em diferentes frações baseada em sua solubilidade em meio aquoso, na qual temos os ácidos fúlvicos que são solúveis em pH ácido ou alcalino, os ácidos húmicos solúveis em pH alcalino e as insolúveis em qualquer pH (IHSS, 2020; MAHLER et al., 2021). Entre os benefícios dessas frações estão sua capacidade de melhorar a retenção do solo, diminuindo os processos de erosão e, assim, favorecendo uma boa estrutura do solo que influencia sobre a disponibilidade de nutrientes, desenvolvimento e crescimento das culturas agrícolas (ROSSET et al., 2016).

Já as frações oxidáveis são a parte do reservatório de C obtidas por diferentes graus de oxidação e são mais sensíveis às mudanças sobre as propriedades físicas e químicas do solo do que o carbono orgânico total, assim, essas frações podem ser usadas como indicador de mudanças dinâmicas do CO (CHAN et al., 2001; XU et al., 2020). Proposta por Chan et al. (2001), esse tipo de fracionamento ofereceu dividir a quantidade de C oxidado em quatro frações com diferentes graus de labilidade: carbono oxidável muito lábil (F1), carbono oxidável lábil (F2), carbono oxidável menos lábil (F3) e carbono oxidável não lábil (F4). As frações de F1 e F2 são as frações mais facilmente oxidáveis, consistindo principalmente de polissacarídeos, matéria orgânica jovem em decomposição, hifas fúngicas e outros produtos microbianos, que contribuem para a utilização e disponibilidade de nutrientes, enquanto que as frações de F3 e F4 são correlacionadas com compostos de alta estabilidade química, sendo lentamente decompostas por microrganismos do solo (ROSSET et al., 2016; XU et al., 2020; SONG et al., 2021).

Outra técnica bastante estudada seria o emprego da abundância natural de isótopos estáveis de C e N ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$). Esta técnica que tem sido usada para indicar o estado e o ciclo de C e N do ecossistema, a qual tem demonstrado ser um potencial indicador para entender as modificações ocasionadas pela substituição da vegetação natural por ambientes agrícolas (LOSS et al., 2014; PEGORARO et al., 2016; DURIGAN et al., 2017; BIELUCZYK et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021b). A completa mudança na predominância dos ciclos fotossintéticos (C3 para C4), assim como os diferentes processos químicos (mineralização, imobilização, desnitrificação e nitrificação), podem fornecer informações em relação às perdas ou ganhos no conteúdo desses elementos, conseqüentemente maior compreensão sobre as modificações ocasionadas pela substituição da cobertura do solo (ALVES et al., 2005; BIELUCZYK et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021b).

Pela abundância natural do ^{13}C é possível identificar as fontes de vegetais que originam sua fixação no solo pelas diferentes vias fotossintéticas das plantas. Graças a existência de diferentes vias fotossintéticas (C3, C4 e CAM) é possível identificar o grupo de plantas que contribuíram para o incremento de C do solo e mensurar sua participação sobre o mesmo (BIELUCZYK et al., 2020). Pelos diferentes ciclos fotossintéticos temos que as plantas C3 apresentem uma composição isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) variando de -22 a -34‰, as plantas C4, variam de -6 a -19‰ e as CAM apresentam um comportamento intermédio variando de -10 a -32‰ (CERNUSAK et al., 2013; CHALK, 2016; BIELUCZYK et al., 2020), isso seria como uma impressão digital das fontes originais do C, possibilita identificar as diferenças pelo enriquecimento desta no solo.

Já em relação ao isótopo estável ^{15}N , seu enriquecimento na biosfera é oriundo da discriminação ocasionado durante diferentes processos de transformação do ciclo deste elemento no solo. Os microrganismos do solo durante o processo de decomposição e transformação da matéria orgânica e das formas mineral e orgânica do N realizam a diferenciação dos isótopos ^{14}N e ^{15}N , na qual devido ao segundo ser mais pesado perde-se maior conteúdo do primeiro por processos como a mineralização e imobilização, assim como pelas transformações como desnitrificação/nitrificação, possibilitando com isso obter informações sobre a questão da humificação de compostos orgânicos, processos de perda e redução na labilidade de C e N (PEGORARO et al., 2016; MAKAROV et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021b).

Diante do presente exposto, este trabalho teve como hipótese que a substituição da vegetação natural por pastagens com diferentes anos de recuperação proporciona modificações positivas sobre os atributos físicos, químicos, biológicos e dinâmica das frações da MOS em um Plintossolo Argilúvico na região da Amazônia Maranhense. Para avaliar essa hipótese, esta tese foi dividida em quatro capítulos com diferentes objetivos:

Capítulo I, intitulado de “Alterações em atributos químicos, físicos e biológicos em solo com pastagens recuperadas pela integração lavoura-pecuária na Amazônia Maranhense”, e teve como objetivo avaliar as modificações sobre os atributos químicos, físicos e biológicos em pastagens manejadas com diferentes tempos de recuperação em sistema de integração lavoura-pecuária.

Capítulo II, intitulado de “Carbono, nitrogênio e frações físicas da matéria orgânica em pastagens recuperadas na Amazônia Maranhense”, e teve como objetivo avaliar os impactos sobre os teores e estoques de C, N e frações granulométricas da matéria orgânica do solo (MOS) em pastagens com diferentes anos de recuperação, quando comparadas à floresta secundária.

Capítulo III, intitulado de “Substâncias húmicas e frações oxidáveis da matéria orgânica em diferentes ambientes na Amazônia Maranhense”, e teve como objetivo avaliar os teores de carbono (C) sobre as frações químicas e oxidáveis do solo em pastagens com diferentes anos de recuperação, quando comparadas à floresta secundária.

Capítulo IV, intitulado de “Quais os impactos causados pela remoção da vegetação natural nos teores de carbono e nitrogênio em Plintossolo na Amazônia Maranhense?”, e teve como objetivo avaliar os teores, estoques e abundância isotópica do carbono (C) e nitrogênio (N) em pastagens com diferentes anos de recuperação, quando comparadas à floresta secundária.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. C.; BICUDO, S. J.; SOBRINHO, J. R. S. C.; MARTINS, A. L. L.; COELHO, K. P.; MOURA, E. G. Nutrient recycling and physical indicators of alley cropping system in sandy loam in the pre-Amazon region of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.86, n.5, p.189-198, 2010.
- ALMEIDA, F. P.; BRASIL, E. P. F.; LEANDRO, W. M.; BARROS, L. R.; ANDRAUS, M. P.; CARDOSO, A. A.; FAQUIM, A. C. S.; KNAPP, F. M.; MEDRADO, L. C.; ANJOS, J. C. R.; SILVA, G. C.; LOPES, A. P. Physical and chemical attributes of soil in areas of cane energy. *In*: Ribeiro, Júlio César (org.). **Avanços científicos e tecnológicos nas ciências agrárias 4**. Ponta Grossa: Atena, 2020. p.1-11.
- ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; JANTALIA, C.P.; BODDEY, R.M. & URQUIAGA, S. Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta. *In*: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Eds). **Processos biológicos no sistema solo-planta: Ferramentas para uma agricultura sustentável**. Brasília: Embrapa-SCT, 2005. p.343-350.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazonica**, v.41, n.1, p.103-114, 2011.
- ASSUNÇÃO, S. A.; OLIVEIRA, A. P. P.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E. Soil organic matter fractions affected by N-fertilizer in a green cane management in Brazilian Coastal Tableland. **Bragantia**, v.77, n.2, p.356-364, 2018.
- BASTOS, A. S.; SANQUETTA, C.; MANIESI, V.; SANQUETTA, M. N. I.; CORTE, A. P. D. Estoques de carbono e propriedades físicas de Plintossolos em diferentes usos do solo na Amazônia. **Ciência Florestal**. v.31, n.2, p.749-765, 2021.
- BEHERA, S. K.; SHUKLA, A. K. Spatial Distribution of Surface Soil Acidity, Electrical Conductivity, Soil Organic Carbon Content and Exchangeable Potassium, Calcium and Magnesium in Some Cropped Acid Soils of India. **Land Degradation & Development**, v.26, n.1, p.71-79, 2014.
- BELTRÁN, M. J., SAINZ-ROZAS, H., GALANTINI, J. A., ROMANIUK, R. I., BARBIERI, P. Cover crops in the Southeastern region of Buenos Aires, Argentina: effects on organic matter physical fractions and nutrient availability. **Environmental Earth Sciences**, v.77, n.6, p.1-11, 2018.
- BENCHIMOL, S. A. **Amazônia: a guerra na floresta**. 2. ed. Manaus: Edua, 2011. 214p.
- BIELUCZYK, W., PICCOLO, M. C., PEREIRA, M. G., MORAES, M. T., SOLTANGHEISI, A., BERNARDI, A. C. C., PEZZOPANE, J. R. M., OLIVEIRA, P. P. A., MOREIRA, M. Z., CAMARGO, P. B., DIAS, C. T. S., BATISTA, I., CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v.371, n.6, p.114368, 2020.

CAMBARDELLA, C. A., ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, n.3, p.777-783, 1992.

CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; PAIXÃO, L. S.; LOURENÇO, F., CARDOZO, E. G.; RODRIGUES, T. O.; SILVA, H. R.; MEDINA, J.; SOUSA, T. M. C.; ROCHA, A. E.; REIS, F. O. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, v.94, n.5, p.1781-1792, 2020.

CELETANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; MUNIZ, F. H.; VARGA, I. V. D.; MARTINZ, C.; CARNEIRO, M. S.; MIRANDA, M. V. C.; BARROS, M. N. R.; FREITAS, L.; NARVAES, I. S.; ADAMI, M.; GOMES, A. R.; RODRIGUES, J. C.; MARTINS, M. B. Towards zero deforestation and forest restoration in the Amazon region of Maranhão state, Brazil. **Land Use Policy**. v.68, n.11, p.692-698, 2017.

CERNUSAK, L. A.; UBIERNA, N.; WINTER, K.; HOLTUM, J. A. M.; MARSHALL, J. D.; FARQUHAR, G. D. Environmental and physiological determinants of carbon isotope discrimination in terrestrial plants. **New Phytologist**, v.200, n.4, p. 950-965, 2013.

CHALK, Phillip Michael. From production to consumption: tracing C, N, and S dynamics in Brazilian agroecosystems using stable isotopes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1039-1050, 2016.

CHAN, K. Y.; BOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in a paleustalf under different pasture leys. **Soil Science**, v.166, n.1, p.61-67, 2001.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, D. M. S.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils - Effects of land use change on soil chemical attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.211, n.12, p.173-184, 2015.

CONCEIÇÃO, P. C., BAYER, C., DIECKOW, J., SANTOS, D. C. Physical fractionation of organic matter and carbon management index of an Alfisol subjected to conservation management systems. **Ciência Rural**, v.44, n.5, p.794-800, 2014.

CORRÊA-MARTINS, F. J.; MENDES, J. C.; BERTOLINO, L. C.; MENDONÇA, J. D. O. Petrografia, Diagênese e Considerações sobre Proveniência da Formação Itapecuru no Norte do Maranhão (Cretáceo Inferior, Bacia do Parnaíba, NE Brasil). **Anuário do Instituto de Geociências**, v.41, n.3, p.514-530, 2019.

COSTA, E. M.; SILVA, H. F.; RIBEIRO, P. R. A. Soil organic matter and its role in the maintenance and productivity of agricultural systems. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, n.17, p.1842-1860, 2013.

CUNHA, T. J. F.; MENDES, M. A. S.; GIONDO V. Matéria orgânica do solo. *In*: Nunes, R.R., Rezende, M. O. O. (Org.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos, SP: Cubo, 2015. p.273-293.

DIAS-FILHO, M. B. **Recuperação de pastagens degradadas na Amazônia**: Desafios, oportunidades e perspectivas. In R. H. R. Sambuichi, et al. (Eds.), Políticas agroambientais e sustentabilidade: Desafios, oportunidades e lições aprendidas. Brasília: IPEA, Brasil. 2014. p. 149-169.

DURIGAN, M.R.; CHERUBIN, M.R.; DE CAMARGO, P.B.; FERREIRA, J.N.; BERENQUER, E.; GARDNER, T.A.; BARLOW, J.; DIAS, C.T.S.; SIGNOR, D.; JUNIOR, R.C.O.; CERRI, C.E.P. Soil Organic Matter Responses to Anthropogenic Forest Disturbance and Land Use Change in the Eastern Brazilian Amazon. **Sustainability**, v.9, n.3, p.1-16, 2017.

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; SOUZA JÚNIOR, P. R.; CAMPOS, M. C. C. Multivariate analyzes of soil chemical attributes for characterization of environments. **Revista Agro@mbiente On-line**, v.8, n.2, p.155-164, 2014.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; SOARES, P. F. C.; BARROS, F. C.; PERIN, A.; ROSSI, C. Q. Compartments of organic matter in an Oxisol under different types of no-tillage systems. **Semina: Ciências Agrárias**, v.39, n.2, p.533-548, 2018.

HAGHVERDI, K.; KOOCH, Y. Soil carbon and nitrogen fractions in response to land use/cover changes. **Acta Oecologica**, v.109, n.11, p.103659, 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Amazônia Legal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/30958-ibge-atualiza-limites-de-municipios-no-mapa-da-amazonia-legal>. Acesso em: 28/08/2021.

IHSS - International Humic Substances Society. What are humic substances? **International Humic Substances Society**, 2020. Disponível em: <<http://humic-substances.org/>>. Acesso em: 20/08/2021.

INPE - NATIONAL INSTITUTE FOR SPACE RESEARCH. **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites - sistemas Prodes, Deter, Degrad e Queimadas**. São José do Campos: INPE, 2020. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates> Acesso em: 20 de março de 2021.

KLOSTER, N.; PÉREZ, M.; BONO, A. Assessment of total, organic and inorganic carbon in soils of semiarid Argentinian pampas. **Ciencia del Suelo**, v.34, n.2, p.365-372, 2016.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Natural abundance of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in management systems conservation in the Cerrado. **Bioscience Journal**, v.30, n.3, p.604-615, 2014.

MAHLER, C. F.; SVIERZOSKI, N. S.; BERNADINHO, C. A. R. Chemical Characteristics of Humic Substances in Nature. In: MAKAN, A. (ed). **Humic Substance**. London: IntechOpen, 2021. p.1-12.

MAKAROV, M. I.; KADULIN, M. S.; MALYSHEVA, T. I. ^{15}N Abundância natural de biomassa microbiana do solo em ecossistemas alpinos e de tundra. **Eurasian Soil Science**, v.54, n.6, p.907-917, 2021.

MARANHÃO. **Atlas do Maranhão**. Secretaria de Estado do Planejamento e Orçamento, Núcleo Geoambiental UEMA. São Luís: SEPLAN, 2013. 90p.

MELO, V. F.; SILVA, D. T.; EVALD, A.; ROCHA, P. R. R. Chemical and biological quality of the soil in different systems of use in the savanna environment. **Revista Agro@mbiente Online**, v.11, n.2, p.101-110, 2017.

MENDONÇA, E. S., MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. second ed., Viçosa: Gefert, 2017. 221p.

MESQUITA, B. A. Política de desenvolvimento e desigualdade regionais: o caráter seletivo e residual da intervenção governamental no Maranhão. **Revista de Políticas Públicas**, v.11, n.2, p.27-50, 2007.

MOSIER, S.; APFELBUAM, S. BYCK, P.; CALDERON, F.; TEAGUE, R.; THOMPSON, R. COTRUFO, M. F. Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in southeastern U.S. grazing lands. **Journal of Environmental Management**, v.288, n.6, p.112409, 2021.

MOURA, E G, ALBUQUERQUE, J. M, AGUIAR, A. C. F. Growth and productivity of corn as affected by mulching and tillage in alley cropping systems. **Scientia Agricola**, v.65, n.2, p.204-208, 2008.

MOURA, E. G. (Ed.). **Agroambientes de transição entre o trópico úmido e semi-árido do Brasil**. 2 ed. São Luís: UEMA, 2006. 312p.

MOURA, E.; PORTELA, S.; MACEDO, V.; SENA, V.; SOUSA, C.; AGUIAR, A. Gypsum and Legume Residue as a Strategy to Improve Soil Conditions in Sustainability of Agrosystems of the Humid Tropics. **Sustainability**, v.10, n.4, p.1-12, 2018.

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P.; SILVA, J. R. M.; PAULINO, L. A. Total organic carbon stock and granulometric fractioning of organic matter in soil use systems in Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.18, n.1, p.136-145, 2019.

OLIVEIRA, A. B.; PAZ, D. A. S.; PEREIRA, A. M. Grandes projetos agro-minero-exportadores na inserção da silvicultura do eucalipto na Amazônia Maranhense. **Revista caminhos de Geografia**, v.22, n.79, p.219-231, 2021a.

OLIVEIRA, N.; SCHIAVO, J.; LIMA, M.; LARANJEIRA, L.; NUNES, G.; DA CRUZ, S. Isotopic variations of carbon and nitrogen and their implications on the conversion of Cerrado vegetation into pasture. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, v.56, n.2, p. 266-273, 2021b.

OZÓRIO, J. M. B., ROSSET, J. S., SCHIAVO, J. A., SOUZA, C. B. S., FARIAS, P. G. S., OLIVEIRA, N. S., MENEZES, R. S., PANACHUKI, E. Physical fractions of organic matter and mineralizable soil carbon in forest fragments of the Atlantic Forest. **Revista Ambiente & Água**, v.15, n.6, p.2601, 2020.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; FONSECA, S. The ^{15}N natural abundance and nitrogen forms in Ultisol cultivated with eucalyptus and acacia. **Ciência Florestal**, v.26, n.1, p.295-305, 2016.

REIS, V. R. R.; DEON, D. S.; MUNIZ, L. C.; GARCIA, U. S.; CANTANHÊDE, I. S. L.; REGO, C. A. R. M.; COSTA, J. B.; MARQUES, E. O. Soil Chemical Attributes under Crop-Livestock-Forest Integration System and in Different Land Uses in Mata dos Cocais Region. **Journal of Agricultural Science**. v.10, n.4, p.370-380, 2018b.

REIS, V. R. R.; DEON, D. S.; MUNIZ, L. C.; SILVA, M. B.; REGO, C. A. R. M.; GARCIA, U. S.; CANTANHÊDE, I. S. L.; COSTA, J. B. Carbon Stocks and Soil Organic Matter Quality Under Different of Land Uses in the Maranhense Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n. 5, p.329-337, 2018a.

RODRIGUES, M.; RABELO, F. H. S.; CASTRO, H. A.; ROBOREDO, D.; CARVALHO, M. A. C.; ROQUE, C. G. Changes in chemical properties by use and management of an oxisol in the Amazon biome. **Revista Caatinga**, v.30, n.2, p.278-286, 2017.

ROSA, D. M.; NOBREGA, L. H. P.; MAULI, M. M.; LIMA, G. P.; PACHECO, F. P. Humic substances in soil cultivated with cover crops rotated with maize and soybean. **Revista Ciência Agronômica**, v.48, n.2, p.221-230, 2017.

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

ROSSET, J. S., LANA, M. C., PEREIRA, M. G., SCHIAVO, J. A., RAMPIM, L., SARTO, M. V. M. Organic matter and soil aggregation in agricultural systems with different adoption times. **Semina: Ciências Agrárias**, v.40, n.6, p.3443-3460, 2019.

ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Chemical and oxidizable fractions of soil organic matter under different management systems in an Oxisol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1529-1538, 2016.

SANTOS, C. C.; FERRAZ JUNIOR, A. S. L.; SÁ, S. O.; MUÑOZ GUTIÉRREZ, J. A.; BRAUN, H.; SARRAZIN, M.; BROSSARD, M.; DESJARDINS, T. Soil carbon stock and Plinthosol fertility in smallholder land-use systems in the eastern Amazon, Brazil, **Carbon Management**, v.9, n.6, p.655-664, 2018.

SANTOS, G. G.; SOUZA, V. Q.; CARMO, A. P. M.; SANTOS, N. G. S.; FREITAS, L. S.; NERIS, J. P. F.; COSTA, J. N.; AGUIAR, E. S.; LIMA, F. M. S.; ARAÚJO, R. G. Análise espacial das principais produções agropecuárias do estado do Maranhão. In: Mendonça, M. S. (ed). **Agronegócio: técnicas, inovações e gestão**. Guarujá, SP: Científica Digital, 2021. p.287-302.

SILVA JUNIOR, C. H. L.; CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; DE MOURA, E. G.; VARGA, I. V. D.; MARTINEZ, C.; MARTINS, M. B. Amazon Forest on the edge of collapse in the Maranhão State, Brazil. **Land Use Policy**, v.97, n.9, p.104806, 2020.

SILVA, C. A. A. C.; OLIVEIRA, K. A.; CASTRO, M. P. P.; OLIVEIRA, A. K. S.; ALMEIDA, E. I. B.; SOUSA, W. S. Analysis of the dynamics in the use of Maranhão land in the Legal Amazon. **Revista Verde**, v.14, n.3, p.443-452, 2019.

SILVA, C.; PEREIRA, M.; FEITOSA, J. C.; FONSECA JÚNIOR, A.; GAIA-GOMES, J. H.; MENEZES, C. E. Soil organic matter fractions, chemical attributes and aggregation under forestry and agricultural systems. **Comunicata Scientiae**, v.8, n.3, p.459-468, 2018a.

SONG, Y.; ZHAI, J.; ZHANG, J.; QIAO, L.; WANG, G.; MA, L.; XUE, S. Forest management practices of *Pinus tabulaeformis* plantations alter soil organic carbon stability by adjusting microbial characteristics on the Loess Plateau of China. **Science of The Total Environment**, v.766, n.4, p.144209, 2021.

XU, H.; WANG, X.; QU, Q.; ZHAI, J.; SONG, Y.; QIAO, L.; LIU, G.; XUE, S. Cropland abandonment altered grassland ecosystem carbon storage and allocation and soil carbon stability in the Loess Hilly Region, China. **Land Degradation & Development**, v31, n.8, p.1001-1013, 2020.

3 CAPÍTULO I - ALTERAÇÕES EM ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E BIOLÓGICOS EM SOLO COM PASTAGENS RECUPERADAS PELA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NA AMAZÔNIA MARANHENSE

3.1 RESUMO

Os atributos edáficos têm sido usados para verificar o impacto dos diferentes manejos adotados, auxiliando no fornecimento de informações que comprovem os benefícios para a manutenção do agroecossistema. Este trabalho teve como objetivos avaliar as modificações sobre os atributos químicos, físicos e biológicos em pastagens manejadas com diferentes tempos de recuperação em sistema de integração lavoura-pecuária. Foram avaliados os seguintes manejos: Floresta secundária (FS), Pastagem perene (PP), Pastagem recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) e Pastagem recuperada e formada há oito anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). Foram determinados os atributos físicos: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência a penetração e umidade; os atributos biológicos: C da biomassa microbiana, respiração basal, quociente metabólico e quociente microbiano e os atributos químicos: pH, H+Al, Al³⁺, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, MO, SB, CTC e V para as camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. As áreas de FS e P8 apresentaram as maiores contribuições da camada superficial sobre os teores de MO e junto com a PP para o complexo sortivo do solo estas áreas tiveram os melhores resultados. Para os atributos físicos e biológicos, as áreas FS e P8 apresentaram os melhores resultados, proporcionando impactos no ambiente edáfico. A pastagem perene e a recuperada após oito anos apresentaram os melhores resultados sobre os atributos do solo proporcionados pelas características inerentes ao sistema radicular da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

PALAVRAS-CHAVE: Atributos edáficos, Plintossolos, Sistemas de manejos, Sistemas integrados.

CHANGES IN CHEMICAL, PHYSICAL, AND BIOLOGICAL SOIL ATTRIBUTES OF GRASSLAND RECOVERED BY INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS IN THE MARANHENSE AMAZON

ABSTRACT

Edaphic attributes have been used to verify the impact of the different managements adopted, helping to provide information that proves the benefits for the maintenance of the agroecosystem. This study aimed to evaluate the changes in chemical, physical and biological attributes in grassland managed with different recovery times in a crop-livestock integration system. The following managements were assessed: Secondary Forest (SF), Grassland (PP), Grassland recovered and formed five years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) and Grassland recovered and formed eight years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). The variables evaluated were the physical attributes: soil density (Ds), total porosity (Pt), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), penetration resistance (Rp) and soil moisture (Ug); the biological attributes: C content of microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and microbial quotient), and chemical attributes: pH, H+Al, Al³⁺, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, OM, SB, CTC and V in the layers of 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30, and 0.30-0.40 m. The FS and P8 areas presented the greatest contributions of the surface layer on the OM contents and together with the PP for the soil sorption complex these areas had the best results. For the physical and biological attributes, the FS and P8 areas presented the best results, providing impacts on the edaphic environment. The perennial grassland and the one recovered after eight years showed the best results on the soil attributes provided by the characteristics inherent to the root system of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

KEYWORDS: Edaphic attributes, Plinthsoils, Management systems, Integrated systems.

3.2 INTRODUÇÃO

O bioma Amazônia ocupa 34% do território do Estado do Maranhão e vem sofrendo fortes modificações devido ao manejo inadequado da pastagem e o uso do fogo, visando preparo da área ou recuperação da pastagem, colaborando para o processo de erosão do solo e degradação (MARANHÃO, 2013; REIS et al., 2018; SANTOS et al., 2018a). Essa mudança da cobertura vegetal na região da Amazônia Maranhense tem ocasionado impactos negativos sobre os atributos edáficos, proporcionando mudanças no ciclo de deposição, acúmulo e qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) e diminuição da capacidade produtiva do solo, dependendo do sistema de manejo adotado (RODRIGUES et al., 2017; REIS et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2022).

Estimam-se que 30 milhões de hectares de pastagens estejam comprometidas no Brasil com algum estágio de degradação devido ao manejo inadequado que tem levado ao processo de perdas de produtividade e vigor, rendimento animal e atributos do solo (BARBIERI et al., 2017; BUNGENSTAB et al., 2019; CAPRISTO et al., 2021). A recuperação e, ou, renovação das pastagens concomitante a adoção de sistemas conservacionistas, como plantio direto (PD) ou sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs), são alternativas para melhorar as condições produtivas, na qual seria possível aumentar a produtividade da agropecuária nacional sem a necessidade de abertura de novas áreas (DIAS-FILHO, 2014; BARBIERI et al., 2017; SOUSA et al., 2020; CAPRISTO et al., 2021).

O emprego do SIPAs é uma estratégia de produção sustentável que integra diferentes atividades na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotação, buscando efeitos sinérgicos entre os componentes (BUNGENSTAB et al., 2019; SILVA et al., 2021a). Os SIPAs tem sido amplamente divulgado nos últimos anos devido aos efeitos benéficos entre os diferentes componentes empregados, possibilitando ganhos econômicos, ambientais e sociais à atividade agropecuária (BUNGENSTAB et al., 2019; FACCIO CARVALHO et al., 2021; SILVA et al., 2021a).

Os diferentes atributos edáficos têm sido usados para verificar a qualidade do solo e o impacto dos diferentes manejos, graças a sensibilidade destes em encontrar alterações que possam auxiliar no fornecimento de informações que comprovem os benefícios para a manutenção dos agroecossistemas (MACIEL et al., 2018; SILVA et al., 2021a; SILVA et al., 2021b). As modificações abaixo de limites ideais podem alterar diretamente a estrutura física e a atividades químicas e biológicas, com reflexos na qualidade ambiental e produtividade das culturas (MACIEL et al., 2018; SILVA et al., 2021a; SILVA et al., 2021b).

Este trabalho parte da hipótese que a recuperação de pastagens em diferentes momentos com auxílio da integração lavoura-pecuária melhora os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Portanto, esse trabalho teve como objetivo avaliar as modificações sobre os atributos químicos, físicos e biológicos em pastagens manejadas com diferentes tempos de recuperação em sistema de integração lavoura-pecuária.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1 Local de Estudo

O estudo foi realizado na Unidade de Referência Tecnológica (URT) da Embrapa Cocais e Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), no município de Pindaré-Mirim/MA (Figura 1). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo AW com inverno seco, com temperatura média anual de 26 a 27°C e precipitação média anual entre 1900 a 2100 mm (MARANHÃO, 2013; ALVARES et al., 2014).

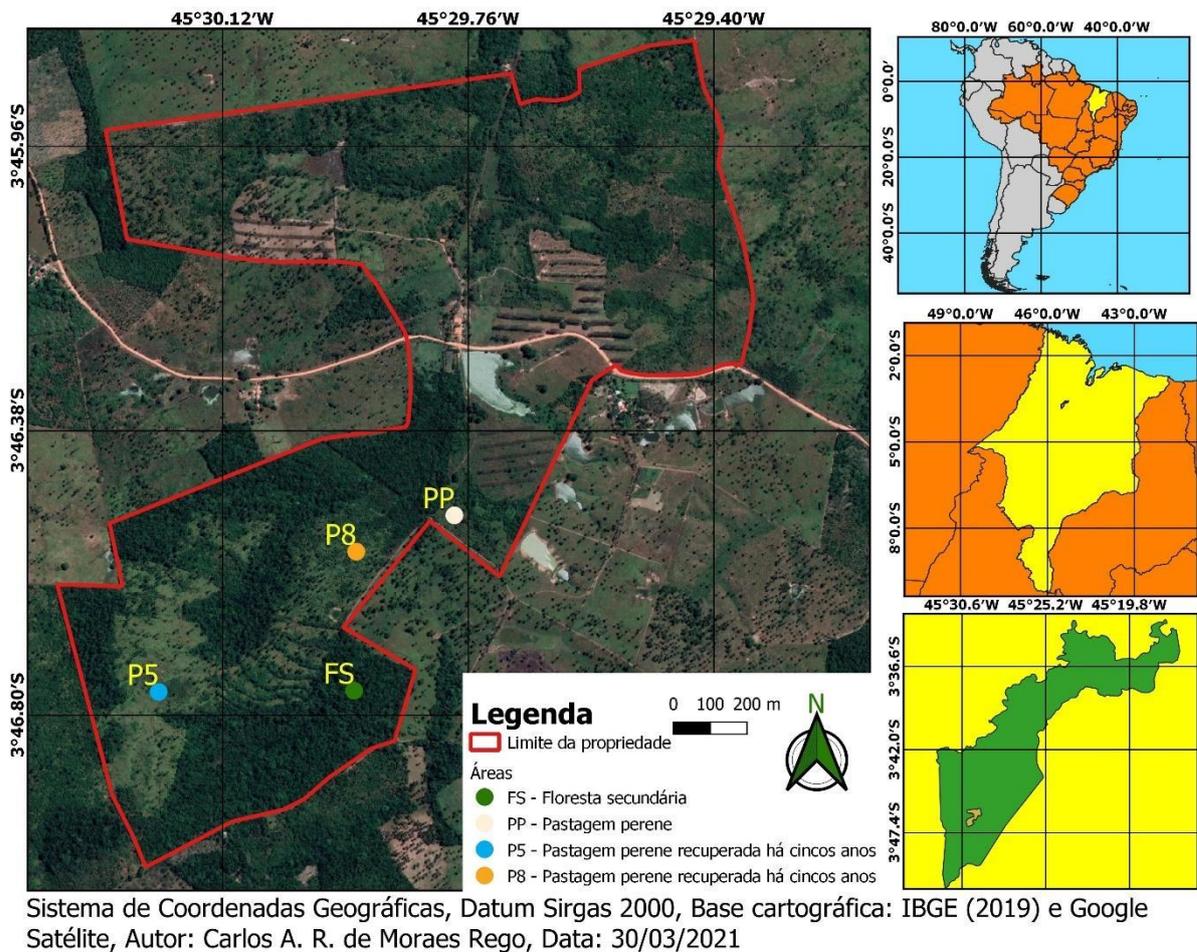


Figura 1. Localização geográfica das áreas de estudo no município de Pindaré-Mirim - MA.

O solo da URT foi classificado como Plintossolo Argilúvico (SANTOS et al., 2018b), de textura média (Tabela 1), originário dos sedimentos da formação Itapecuru e formado por

arenitos finos (MARANHÃO, 2013). O relevo apresenta variações de suave-ondulado a ondulado e recoberto por Floresta Ombrófila associada a vegetação secundária da floresta, com predomínio de palmeira babaçu (*Attalea speciosa* Mart.) (Mata dos Cocais), dominante na região Meio-Norte do estado do Maranhão (MARANHÃO, 2013).

Tabela 1 - Caracterização granulométrica do solo nas diferentes áreas e camadas na região da Pindaré-Mirim, Maranhão, Brasil

Áreas	Camada (m)	Areia	Silte	Argila	Classe textural
		-----g kg ⁻¹ -----			
FS	0,00-0,20	746,65	135,25	118,10	Franco arenosa
	0,20-0,40	707,20	124,25	168,60	
PP	0,00-0,20	579,30	343,00	77,80	
	0,20-0,40	616,05	260,40	123,65	
P5	0,00-0,20	745,50	103,50	150,50	
	0,20-0,40	704,50	169,50	125,50	
P8	0,00-0,20	741,90	120,75	137,30	
	0,20-0,40	723,05	97,30	179,70	

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

3.3.2 Sistemas Avaliados e Históricos de Uso

As áreas avaliadas foram: Floresta secundária (FS), Pastagem perene (PP), Pastagem recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) e Pastagem recuperada e formada há oito anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). São apresentados na tabela 2 os históricos e as características dos manejos avaliados.

Tabela 2 - Históricos e características das áreas estudadas na URT na região de Pindaré-Mirim, Maranhão, Brasil

Áreas	Histórico
Floresta secundária (FS)	Área representada pela Floresta Amazônica Maranhense transicional para a floresta de babaçu, com grande expressão da vegetação secundária, sendo classificada como Floresta Ombrófila Aberta, com predomínio de palmeiras de babaçu (<i>Attalea speciosa</i> Mart.) (Mata dos Cocais) (MARANHÃO, 2013), Além da palmeira de babaçu, são encontradas também palmeira de açai (<i>Euterpe Oleracea</i> Mart.), bacaba (<i>Oenocarpus spp.</i>), andiroba (<i>Carapa spp.</i>), jatobá (<i>Hymenaea spp.</i>), embaúba (<i>Cecropia spp.</i>) (RIOS, 2001). Essa área foi empregada como referência das condições naturais do solo devido ao histórico de preservação, com idade média superior a 50 anos.
Pastagem perene (PP)	Área de pastagem com capim-jaraguá (<i>Hyparrhenia rufa</i> (Ness) Stapf) implantada por volta de 1970 permanecendo até 1999, posteriormente, houve a renovação da pastagem (sem qualquer correção e adubação do solo) com <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu empregando roçagem, queima dos restos vegetais e semeadura a lanço. A pastagem é empregada para pastejo contínuo de bovinos de corte em regime extensivo com taxa de lotação de cerca de 0,7 UA/ha/ano, realizando-se periodicamente roçagem mecanizada a fim de conter a regeneração natural.
Pastagem recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu (P5)	Área como manejo inicial semelhante a PP, com recuperação em 2014 em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), empregando-se a remoção da vegetação com máquina pá carregadeira e gradagem em área total. Posteriormente sendo realizada semeadura mecanizada de milho DKB 175 + <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu, a qual as sementes da forrageira foram misturadas ao adubo no momento do plantio, com adubação de 200 kg ha ⁻¹ do formulado 08-20-20 + Zn de adubação de base e 100 kg ha ⁻¹ de ureia em cobertura. Após a colheita do milho a pastagem formada tem sido empregada para pastejo rotacionado de bovinos de corte com taxa de lotação de 1,0 UA/ha/ano.
Pastagem recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu (P8)	Área com manejo inicial semelhante a PP, com recuperação em 2012 em sistema de ILP, empregando-se a remoção da vegetação com máquina Pá carregadeira e gradagem em área total, sendo realizada semeadura mecanizada de milho DKB 175 + <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu, a qual as sementes da forrageira foram misturadas ao adubo no momento do plantio, com adubação de 200 kg ha ⁻¹ do formulado 08-20-20 + Zn de adubação de base e 100 kg ha ⁻¹ de ureia em cobertura. Após a colheita do milho a pastagem formada tem sido empregada para pastejo rotacionado de bovinos de corte com taxa de lotação de 1,0 UA/ha/ano.

3.3.3 Coleta das Amostras de Solo e Avaliações

Em cada uma das áreas foram abertas cinco trincheiras com dimensões de 1 x 1 x 1 m, dispostas aleatoriamente. As amostras foram coletadas no período do verão, época na qual ocorrem os maiores volumes de precipitação colaborando com o teor de umidade próximo a capacidade de campo. Em paredes opostas da trincheira foram coletadas amostras indeformadas utilizando-se coletor Uhland com anéis volumétricos com volume conhecido de aço inox com 100 cm³, compreendendo as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. A coleta das amostras deformadas foi realizada em três pontos equidistantes de dez metros em relação às paredes da trincheira, com auxílio de trado tipo holandês, totalizando doze amostras simples para compor uma amostra representativa nas mesmas camadas anteriormente citadas. Após coletadas, foram armazenadas em sacolas plásticas para posterior secagem ao ar e passagem

em peneiras com malhas de 2 mm de abertura empregadas para serem realizadas as determinações químicas e biológicas.

Das amostras indeformadas foram determinados os parâmetros físicos: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e a umidade gravimétrica (Ug), pelo método do anel volumétrico em mesa de tensão (TEIXEIRA et al., 2017), e a resistência do solo à penetração (Rp), com o auxílio de penetrógrafo eletrônico modelo penetroLOG-Falker-PLG1020, realizado a campo.

Para os parâmetros químicos foram determinados o pH em CaCl_2 0,01 mol L⁻¹ (relação solo: solução 1:2,5); matéria orgânica do solo (MOS), obtida pela multiplicação do carbono orgânico total (COT), pelo método de Yeomans e Bremner (1988), e o fator "van Bemmelen" de 1,724 (MOS = COT x 1,724); alumínio (Al^{3+}), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, sendo o Al^{3+} determinado por titulação com NaOH 0,015 mol L⁻¹ e o Ca^{2+} e Mg^{2+} determinados por espectrofotômetro de absorção atômica; P e K⁺ extraídos por solução Mehlich 1 (HCl a 0,5 N + H₂SO₄ a 0,025 N), sendo o P determinado em espectrofotômetro UV-VIS, e o K⁺ por fotometria de chama; e a acidez potencial (H + Al) extraída com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ tamponado a pH 7,0, determinada por titulação com NaOH 0,1 mol L⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2017). De posse desses dados foram calculadas a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação de bases (V), conforme RONQUIM (2010).

Em relação aos parâmetros biológicos, a determinação foi realizada apenas na camada de 0,00-0,10 m, por ser considerada a de maior atividade. Sendo estimada a respiração basal do solo (RBS), seguindo o procedimento de Silva et al. (2007a) adaptado de Jenkinson e Powlson (1976), utilizando-se 50 g de solo acondicionado em frascos herméticos de 500 mL na presença de 10 mL de NaOH a 0,5 mol L⁻¹ (solução de captura) e 10 mL de H₂O destilados por sete dias em câmara de BOD com temperatura de 25±1°C e em completo escuro, passado esse período foram adicionados 2 mL de BaCl₂ a 10% e 2 gotas de fenolftaleína a 1% a solução de captura que foi titulado com HCl 0,5 M.

A determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C) realizada pelo método de fumigação e extração, conforme descrito por Silva et al. (2007b) adaptado de Vance et al. (1987), empregando-se 20 g de solo das amostras, fumigação com 1,0 mL de clorofórmio (CHCl_3) aplicado diretamente sobre o solo da amostra e emprego da solução de extração com 50 mL de K₂SO₄ a 0,5 M, em seguida para a determinação do carbono das amostras foram empregados 8 mL da solução extratora, 2 mL de K₂Cr₂O₇ 0,066 M, 5 mL de H₃PO₄, 70 mL de

H₂O deionizada e quatro gotas de difenilamina a ser titulado com Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O 0,033M.

Em seguida das determinações dos teores do BMS-C e RBS foram obtidos o quociente metabólico (qCO₂) e o quociente microbiano (qMic), sendo o primeiro estimado pela relação entre a RBS e BMS-C e o segundo pela relação entre BMS-C e o carbono orgânico total (COT) dividido por 10 (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

3.3.4 Análise Estatística

Os dados oriundos das diferentes áreas foram submetidos aos testes de normalidade e homogeneidade por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Quando atendidos esses pressupostos, as médias foram comparadas pelo teste t a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R 4.1 (R CORE TEAM, 2021).

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As áreas avaliadas apresentaram diferenças para os atributos químicos do solo nas diferentes camadas analisadas, com exceção do Al (Tabela 3). Foram observados que não houve diferenças nos teores de Al em todas as camadas, apresentando teores em média de 0,12, 0,34, 0,69 e 1,28 cmol_c dm⁻³ ao longo das camadas avaliadas, respectivamente. Embora não se tenha encontrado diferenças nas áreas estudadas, verificou-se que em média os teores encontrados variaram de baixa ($\leq 0,3$ cmol_c dm⁻³) a alto ($> 1,0$ cmol_c dm⁻³) (BRASIL et al., 2020).

Nos teores de P na camada 0,00-0,10 m não foram encontradas diferenças entre as áreas, com teores variando de 1,27 a 1,90 mg dm⁻³ com média geral de 1,62 mg dm⁻³ (Tabela 3). Já nas demais camadas a área de FS, apresentou os maiores teores de P, e não diferiu da PP, e apresentou diferença das outras áreas. Em relação aos teores de P encontrados nas áreas foi observado para as condições do solo de textura arenosa e teor de argila menor que 15% esses resultados encontrados estavam baixos (≥ 10) (Tabela 1) (BRASIL et al., 2020).

No geral, os baixos teores encontrados de P em todas as áreas podem ser decorrentes da adsorção por minerais de ferro e alumínio (ANJOS et al., 2007) e a própria natureza pobre do material de origem sedimentar (MOURA et al., 2006). Além disso, os maiores teores de P nas áreas de FS e PP podem ser advindos do preparo com fogo e da eficiência da ciclagem que desse nutriente (MELO et al., 2017). Santos et al. (2018a), ao avaliarem diferentes usos em solos na Amazônia Legal não observaram diferenças entre os teores da floresta secundária e

pastagem atrelando isso ao preparo com fogo da floresta primária que pode colaborar com aporte e a ciclagem desse nutriente ao solo.

Tabela 3 - Atributos de fertilidade química de um Plintossolo Argilúvico em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	P	K	Ca	Mg	Al	H + Al
	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----				
0,00-0,10 m						
FS	1,90 a	0,18 bc	1,90 a	1,68 bc	0,09 a	2,67 b
PP	1,72 a	0,31 a	2,14 a	2,15 b	0,10 a	2,44 b
P5	1,60 a	0,17 c	0,68 b	1,24 c	0,17 a	2,87 b
P8	1,27 a	0,23 b	1,84 a	3,19 a	0,11 a	3,60 a
0,10-0,20 m						
FS	1,67 a	0,13 bc	1,32 bc	1,78 bc	0,42 a	2,67 b
PP	1,39 ab	0,26 a	2,59 a	2,40 ab	0,22 a	2,57 b
P5	1,11 bc	0,10 c	0,48 c	1,23 c	0,40 a	2,81 b
P8	0,94 c	0,17 b	1,49 b	3,14 a	0,34 a	3,60 a
0,20-0,30 m						
FS	1,81 a	0,13 c	1,10 b	2,04 b	0,78 a	3,20 b
PP	1,51 ab	0,28 a	2,57 a	3,19 a	0,86 a	3,83 b
P5	0,97 b	0,10 c	0,44 b	1,32 b	0,56 a	3,07 b
P8	0,96 b	0,20 b	1,28 b	3,70 a	0,57 a	4,85 a
0,30-0,40 m						
FS	1,67 a	0,15 b	0,83 bc	2,37 bc	1,04 a	4,09 b
PP	1,23 ab	0,30 a	2,26 a	3,71 ab	1,89 a	6,11 b
P5	0,87 b	0,10 b	0,32 c	1,34 c	0,68 a	3,10 b
P8	0,94 b	0,26 a	1,23 b	4,74 a	1,50 a	7,06 a

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. P: Fósforo, K: Potássio, Ca: Cálcio, Mg: Magnésio, Al: Alumínio, H+Al: acidez potencial. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, para cada camada, não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Para K, foi observado que a área de PP apresentou os maiores teores, variando de 72 a 115% superior a FS, não diferindo na última camada da P8 (Tabela 3). Já para os teores de Ca na camada superficial que não houveram diferenças entre FS, PP e P8, e nas demais camadas a área de PP apresentou os maiores teores. Os teores de K e Ca encontrados na área de PP podem ser classificados como alto ($>0,23$ cmol_c dm⁻³) e médio (1,6-3,0 cmol_c dm⁻³), respectivamente, (BRASIL et al., 2020) e isso pode correlacionar-se ao preparo inicial realizado com queima dos

resíduos vegetais que têm a capacidade de aportar grandes quantidades desses elementos pelas cinzas geradas (MELO et al., 2017; SANTOS et al., 2018a).

Já para os teores de Mg e valores de H+Al, em todas as camadas avaliadas, a área de P8 apresentou simultaneamente os maiores teores e valores quando comparada às demais áreas. Em relação Mg, foram observados ao longo das camadas avaliadas, independente da área, teores superiores que o Ca, e isso é relacionado à influência marinha no material de origem e a maior solubilidade do Mg em relação ao Ca (ANJOS et al., 2007). Em relação Mg, foram observados ao longo das camadas avaliadas, independente da área, teores superiores que o Ca, e isso é relacionado à influência marinha no material de origem e a maior solubilidade do Mg em relação ao Ca (ANJOS et al., 2007).

Para pH, MO e o complexo sortivo do solo (SB, CTC, V) foram observadas diferenças entre as áreas nas diferentes camadas avaliadas (Tabela 4). Apenas na camada superficial foram observadas diferenças para os valores de pH, com maiores valores se encontravam nas áreas FS, PP e P8. No geral, em todas as áreas foram encontradas para a camada superficial acidez ativa alta (4,5 - 4,8 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), e nas restantes passou para muito alta ($< 4,4 \text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) (RONQUIM et al., 2010). Esses resultados são reflexo das condições tropicais onde os solos são naturalmente ácidos em razão da pobreza do material de origem ou devido aos processos de gênese. Quando verificar-se as áreas é possível ainda ressaltar que podem estar associados em parte a decomposição da MO, a aplicação de fertilizantes nitrogenados no momento da implantação, exsudados radiculares, a formação dos ácidos orgânicos, entre outros fatores.

Os maiores teores de MO foram observados nas áreas de FS, 0,00-0,10 m, P8, 0,10-0,20, e PP, nas últimas camadas. Já para o complexo sortivo do solo foram observados em grande parte das camadas avaliadas que as áreas P8 e PP apresentavam os maiores valores sobre a SB, CTC, V e em alguns casos não diferindo da FS e P5. Esses resultados podem ser correlacionados à deposição de biomassa, tanto de origem vegetal quanto animal, que proporcionam melhorias sobre a ciclagem de nutrientes no sistema (REGO et al., 2020; SILVA et al., 2021a). Já nas camadas subsuperficiais verificou-se mudanças em relação às contribuições sobre os teores de nutrientes (Ca, Mg, K e P) e complexo sortivo, e as áreas de PP e P8 foram as que contribuíram sobre a melhoria dos atributos químicos, e isso pode estar relacionado a questão de exploração e deposição de raízes que se apresenta como potencial aporte orgânico em profundidade proporcionando as melhorias verificados sobre os atributos químicos do solo (ASSIS et al., 2017; REGO et al., 2020; SILVA et al., 2021a).

Tabela 4 - Potencial hidrogeniônico (pH), matéria orgânica (MO), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação de bases (V) de um Plintossolo Argilúvico em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	pH	MO	SB	CTC	V
	CaCl ₂	g kg ⁻¹	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----%-----	
0,00-0,10 m					
FS	4,62 a	16,64 a	3,75 b	6,43 b	57,64 a
PP	4,61 a	12,53 b	4,60 ab	7,04 b	65,03 a
P5	4,39 b	13,21 b	2,09 c	4,96 c	41,38 b
P8	4,70 a	17,00 a	5,26 a	8,86 a	59,37 a
0,10-0,20 m					
FS	4,36 a	7,43 c	3,23 b	5,90 bc	53,20 b
PP	4,56 a	9,28 a	5,25 a	7,82 ab	66,31 a
P5	4,27 a	8,07 b	1,81 b	4,62 c	38,20 c
P8	4,42 a	9,70 a	4,80 a	8,40 a	58,00 ab
0,20-0,30 m					
FS	4,23 a	6,46 d	3,27 b	6,47 b	48,72 b
PP	4,32 a	8,35 a	6,05 a	9,88 a	61,33 a
P5	4,18 a	6,98 c	1,85 b	4,92 b	36,76 c
P8	4,42 a	7,75 b	5,18 a	10,04 a	53,16 ab
0,30-0,40 m					
FS	4,13 a	6,52 b	3,36 b	7,45 b	44,40 a
PP	4,18 a	8,88 a	6,27 a	12,37 a	49,77 a
P5	4,13 a	7,00 b	1,76 b	4,87 b	36,13 a
P8	4,33 a	8,29 a	6,22 a	13,29 a	49,09 a

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, para cada camada, não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Foram observadas diferenças entre as áreas para os atributos físicos e em diferentes camadas (Tabela 5). As principais diferenças entre as áreas foram observadas nas variáveis Ma na camada 0,10-0,20 m, Rp, 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, Pt e Ug, ambas em 0,10-0,20 a 0,30-0,40 m. Ao analisar a Ma, Pt e Ug são encontrados na área de P8 os maiores valores, em muitos casos não diferindo da FS e PP, e na Rp foram observados nas áreas FS, os menores valores foi na área P8.

Entre as áreas avaliadas os valores de Ds encontrados estão abaixo do limite crítico de 1,75 g cm⁻³ para desenvolvimento das culturas em solos arenosos (REICHERT et al., 2015), na qual valores superiores podem prejudicar o crescimento radicular em função da elevada

resistência à penetração. Anjo et al. (2007), analisando horizontes plínticos em ambientes naturais no município de Pinheiro em diferentes porções do relevo e Santos et al. (2018a), em diferentes ambientes no município de Monção, ambos no Maranhão e em Plintossolos, também observaram valores de Ds similares ao presente estudo. Bastos et al. (2021), ao analisarem a Ds em diferentes usos do solo na Amazônia do estado de Rondônia em um Plintossolo, também não encontraram diferenças entre a florestas, pastagem e plantio mistos embora com valores menores ao observado no presente estudo.

Tabela 5 - Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt), Resistência do solo à penetração (Rp) e umidade do solo (Ug) em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	Ds	Ma	Mi	Pt	Rp	Ug
	g cm ⁻³	-----cm ³	cm ³	-----	KPa	%
0,00-0,10 m						
FS	1,333 a	0,077 a	0,332 a	0,408 a	523,0 b	25,04 a
PP	1,420 a	0,065 a	0,352 a	0,415 a	736,8 a	25,37 a
P5	1,353 a	0,062 a	0,350 a	0,411 a	686,7 a	23,33 a
P8	1,370 a	0,081 a	0,345 a	0,426 a	603,6 ab	27,50 a
0,10-0,20 m						
FS	1,413 a	0,067 ab	0,297 a	0,362 bc	973,6 b	20,55 a
PP	1,432 a	0,071 ab	0,306 a	0,375 ab	1845,2 a	20,21 ab
P5	1,480 a	0,049 b	0,293 a	0,341 c	1694,6 a	18,33 b
P8	1,429 a	0,081 a	0,306 a	0,386 a	1211,1 b	22,05 a
0,20-0,30 m						
FS	1,431 a	0,064 a	0,299 a	0,362 ab	969,7 a	21,61 a
PP	1,435 a	0,089 a	0,300 a	0,387 a	1322,4 a	20,68 ab
P5	1,431 a	0,061 a	0,287 a	0,347 b	1236,5 a	18,85 b
P8	1,431 a	0,089 a	0,302 a	0,390 a	1092,6 a	23,02 a
0,30-0,40 m						
FS	1,482 a	0,059 a	0,307 a	0,365 b	940,6 a	21,69 ab
PP	1,452 a	0,076 a	0,311 a	0,387 ab	1088,6 a	21,66 ab
P5	1,432 a	0,064 a	0,293 a	0,356 b	1066,5 a	19,64 b
P8	1,438 a	0,074 a	0,330 a	0,402 a	1013,7 a	24,91 a

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, para cada camada, não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Os melhores resultados da Ma, Pt, Rp e Ug dentro da área P8 pode estar relacionado a deposição e exploração eficiente do sistema radicular fasciculado com alta velocidade de crescimento, e que contribuem para a descompactação do solo e diminuição da Rp, aumento da

porosidade total do solo, possibilitando aumentos sobre a capacidade de armazenamento de água, além do aumento sobre os teores de matéria orgânica que apresenta papel fundamental na qualidade física do solo. Chioderoli et al. (2012), ao avaliar as alterações dos atributos físicos do solo proporcionada pela *Brachiaria* observaram melhorias proporcionadas pela ação das raízes sobre os atributos físicos do solo.

Foi verificado que os valores encontrados de M_a , P_t e R_p foram inferiores ao limite crítico de $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0,32$ a $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e 2000 KPa , respectivamente, para solos com textura arenosa (REYNOLDS et al., 2009; REICHERT et al., 2015). Os atributos físicos encontrados estão dentro dos limites aceitáveis. Sabe-se que os constantes ciclos de umedecimento e secagem que ocorrem na região, o material de origem da Formação Itapecuru ser sedimento composto por arenitos finos (ANJOS et al., 2007; MARANHÃO et al., 2003).

Além disso, aos altos teores de Mg^{+2} podem proporcionar alterações sobre o arranjo das partículas do solo, causando maior empacotamento e coesão entre as partículas, diminuindo a M_a e P_t e aumentando a M_i , D_s e R_p podendo causar adensamento/compactação do solo (SILVA et al., 2001). Bonetti et al. (2017), em diferentes solos com baixos teores de matéria orgânica e argila, também verificaram redução sobre a porosidade do solo causada pelos ciclos de umedecimento e secagem. Portanto, a adição de MOS é o caminho para tentar diminuir esses possíveis impactos, com melhorias nos atributos físicos do solo para a região.

Em relação aos atributos biológicos, foi observado que as áreas de FS e P8 apresentaram os maiores valores de BMS-C, isso significa 27,23 e 21,67% a mais de C microbiano, respectivamente, quando comparadas a média das demais áreas, e também apresentaram os maiores valores para q_{Mic} , não diferindo da PP (Tabela 6). Já para RBS e q_{CO_2} não foram encontradas diferenças, no entanto é possível verificar que a FS e P8 apresentaram, numericamente, as maiores respirações e menores quocientes metabólicos, um acréscimo de 8,16 e 6,12% e 38,57 e 28,72%, respectivamente, quando comparada a PP.

As alterações observadas em BMS-C e q_{Mic} nas áreas de FS e P8, em parte são reflexo dos resultados encontrados nos teores de MO. Estas áreas apresentaram os maiores teores, e pode indicar melhorias em relação a atividade e quantidade dos microrganismos do solo e que ao realizar-se a renovação, aliada ao tempo, proporcionam impactos positivos sobre a atividade biológica do solo (SILVA et al., 2021b). Sousa et al. (2020), ao avaliar diferentes alternativas de integração lavoura pecuária verificaram melhorias e, ou, manutenção dos atributos microbiológicos proporcionados pela rotação com forrageiras quando comparado a floresta.

Tabela 6 - Atributos biológicos Respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C), quociente metabólica (qCO₂) e quociente microbiano (qMic) em diferentes manejos na Amazônia Maranhense na camada de 0,00-0,10 m

Áreas	RBS	BMS-C	qCO ₂	qMic
	mg C-CO ₂ kg ⁻¹ solo h ⁻¹	mg C microbiano kg ⁻¹ solo	mg C-CO ₂ kg ⁻¹ solo h ⁻¹	%
FS	1,06 a	562,73 a	1,93 a	5,05 ab
PP	0,98 a	406,11 b	2,52 a	4,74 ab
P5	1,04 a	412,84 b	2,77 a	4,24 b
P8	1,04 a	522,76 a	2,04 a	5,54 a

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Embora em todas as áreas foram encontrados valores superiores a 1% para qMic, o que indicaria condições não limitantes à atividade microbiológica do solo (DADALTO et al., 2015). Observar-se na área P8 os maiores resultados quando comparada das demais e isso é ocasionado pela maior eficiência da incorporação do C orgânico total do solo na biomassa microbiana, ou seja, nas células microbianas (LOPES et al., 2015; ASSIS et al., 2017). Além disso, esses melhores resultados demonstram melhoria sobre a qualidade da MOS e a quantidade de carbono orgânico que está imobilizado na biomassa microbiana (SILVA et al., 2021b; NEVES et al., 2021).

A não diferença entre as áreas para RBS e qCO₂ podem estar relacionada a questão da ação das raízes pela formação dos exsudados radiculares, como os ácidos orgânicos, uma vez que as forrageiras do gênero *Brachiaria* apresentam sistema radicular bastante expressivo e de rápido crescimento no solo, proporcionando rápida renovação após eventos estressantes como o pastejo, o que poderia ajudar na formação de compostos que beneficiam os microorganismos do solo (LOPES et al., 2015; CAPRISTO et al., 2021).

Assis et al. (2017) e Assis et al. (2019), verificaram que mesmo em situações de pastagens mal manejadas, estas são capazes de auxiliar o desenvolvimento satisfatório da atividade microbiana, devido ao sistema radicular fasciculado, resulta no aumento da entrada de C no solo através da rizosfera e necromassa, os quais ativam a microbiota no solo. Capristo et al. (2021), ao avaliar formas de renovação e recuperação da pastagem também não encontraram diferenças sobre os atributos biológicos RBS e qCO₂.

É interessante mencionar que quanto menor o qCO₂ podemos ter um indicativo de maior eficiência metabólica por parte dos microorganismos do solo (LOPES et al., 2015; ASSIS et al., 2017), contribuindo para o acúmulo de C, com isso mesmo não tendo-se observado

diferenças é possível verificar os menores valores as áreas FS e P8, justamente as que apresentaram aos maiores teores de MO (Tabela 4). De acordo com Gonçalves et al. (2019), os atributos biológicos podem auxiliar de maneira rápida e prática no entendimento das alterações ocasionadas em função dos diferentes manejos sobre o solo, uma vez que são indicadores bastante sensíveis às mudanças ocorridas sobre o solo pelas mudanças no padrão das plantas exploradas.

3.5 CONCLUSÃO

A recuperação de pastagem após oito anos realizada por meio da integração lavoura pecuária proporcionou melhorias sobre os diferentes atributos químicos, físicos e biológicos do solo dentro das camadas analisadas equiparando e superando, em alguns casos, a floresta secundária e a pastagem perene.

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. J.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2014.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient of CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental condition, such as pH, on the microbial of forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.25, n.3, p. 393-395, 1993.

ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; PEREZ, D. V.; RAMOS, D. P. Caracterização e classificação de Plintossolos no Município de Pinheiro-MA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.5, p.1035-1044. 2007.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; SILVEIRA, A. L. R.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J.; MADARI, B. E. Biological Soil Properties in Integrated Crop-Livestock-Forest Systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.41, n.1, p.e0160209, 2017.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J.; MADARI, B. E.; HEINEMANN, A. B. Physical, chemical and biological soil attributes in integrated crop-livestock-forestry systems. **Revista Agrarian**, v.12, n.43, p.57-70, 2019.

BARBIERI, R. S.; MONTANARI, R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. 3; PANOSSO, A. R.; LIMA, C. G. R. Spatial variability of physical and chemical attributes for the recovery of a Red Argisol under degraded pasture in the Cerrado. **Revista Espacios**, v.38, n.32, p.1-18, 2017.

BASTOS, A. S.; SANQUETTA, C. R.; MANIESI, V.; SANQUETTA, M. N. I.; CORTE, A. P. D. Amazon plinthosols: carbon stocks and physical properties under different land uses. **Ciência Florestal**, v.31, n.2, p.749-765, 2021.

BONETTI, J. DE A.; ANGHINONI, I.; DE MORAES, M.T.; FINK, J.R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil & Tillage Research**. v.174, n.12, p.104-112, 2017.

BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. de J. M. (Ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 419 p.
BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L.C.; FERREIRA, A. D. **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília: Embrapa, 2019, 835 p.

CAPRISTO, D. P.; CECCON, G.; FACHINELLI, R.; TOMAZI, M. Microbiological and structural quality of Oxisol under pasture renewal systems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.51, n.1, p.e68006, 2021.

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Physycal properties of soil and yield of soybeans in corn braquiaria consortium. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.1, p.37-43, 2012.

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

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 38 p.

FACCIO CARVALHO, P. C.; SAVIAN, J. V.; DELLA CHIESA, T.; SOUSA FILHO, W.; TERRA, J. A.; PINTO, P.; POSSELT MARTINS, A.; VILLARINO, S.; TRINDADE, J. K.; ALBUQUERQUE NUNES, P. A.; PIÑEIRO, G. Land-use intensification trends in the rio de la plata region of south america: toward specialization or recoupling crop and livestock production. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v.8, n.1, p.97-110, 2021.

GONÇALVES, V. A.; MELO, C. A. D.; ASSIS, I. R.; FERREIRA, L. R.; SARAIVA, D. T. Microbial biomass and activity of soil under different cropping systems and crop successions. **Revista de Ciências Agrárias - Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v.62, n.1, p.1-8, 2019.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil - V. A method for measuring soil biomass. **Soil Biology & Biochemistry**, v.8, n.3, p.209-213, 1976.

LOPES, E. L. N.; FERNANDES, A. R.; TEIXEIRA, R. A.; SOUSA, E. S.; RUIVO, M. L. P. Atributos do solo sob diferentes sistemas de manejo de culturas em um Latossolo Amazônico. **Bragantia**, v. 74, n.4, p.428-435, 2015.

MACIEL, T. C. M.; SANTOS, F. G. B.; ALCANTARA, F. D. O.; VÁSQUEZ, M. A. N. Atributos físicos e químicos de solos em diferentes sistemas de uso: um estudo de caso no cariri cearense. **Revista Acta Kariri – Pesquisa e Desenvolvimento**, n.3, n.1, p.22-36, 2018.

MARANHÃO. **Atlas do Maranhão**. Secretaria de Estado do Planejamento e Orçamento, Núcleo Geoambiental UEMA. São Luís: SEPLAN, 2013. 90p.

MELO, V. F.; ORRUTÉA, A. G.; MOTTA, A. C. V.; TESTONI, S. A. Land Use and Changes in Soil Morphology and Physical-Chemical Properties in Southern Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.41, n.1, p.e0170034, 2017.

MOURA, E. G. (Ed.). **Agroambientes de transição entre o trópico úmido e semi-árido do Brasil**. 2 ed. São Luís: UEMA, 2006. 312p.

NEVES, L. V. DE M. W.; FRACETTO, F. J. C.; FRACETTO, G. G. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; ARAUJO, J. K. S.; SANTOS, J. C. B.; MENDES JÚNIOR, J. P. M.; SOUSA JÚNIOR, V. S. Microbial abundance and C and N stocks in tropical degraded Planosols from semiarid northeastern Brazil. **Catena**, v. 196, n.1, p.104931, 2021.

OLIVEIRA, H. M. R.; SANTOS, A. C.; LEITE, R. C.; OLIVEIRA, L. B. T.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, T. S. Repercussion of pastoral systems in C and N fractions stock in northeast Amazonia. **Catena**, v.208, n.1, p.105742, 2022.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Austria: Vienna, 2021.

REGO, C. A. R. M.; OLIVEIRA, P. S. R.; PIANO, J. T.; EGEWARTH, J. F.; EGEWARTH, V. A.; HERRERA, J. L.; GONCALVES JUNIOR, A. C. Chemical properties and physical fractions of organic matter in oxisols under integrated agricultural production systems. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 7, n.3, p. 81-89, 2020.

REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; BERVALD, C. M. P.; KATO, O. R. Fire-free fallow management by mechanized chopping of biomass for sustainable agriculture in eastern amazon: effects on soil compactness, porosity, and water retention and availability. **Land Degradation & Development**, v.27, n.5, p.1403-1412, 2015.

REIS, V. R. R.; DEON, D. S.; MUNIZ, L. C.; GARCIA, U. S.; CANTANHÊDE, I. S. L.; REGO, C. A. R. M.; COSTA, J. B.; MARQUES, E. O. Soil Chemical Attributes under Crop-Livestock-Forest Integration System and in Different Land Uses in Mata dos Cocais Region. **Journal of Agricultural Science**. v.10, n.4, p.370-380, 2018.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v.152, n.3-4, p.252-263, 2009.

RIOS, L. **Estudos de Geografia do Maranhão**. São Luís: Gráphis Editora, 2001. 50p.

RODRIGUES, M.; RABELO, F. H. S.; CASTRO, H. A.; ROBOREDO, D.; CARVALHO, M. A. C.; ROQUE, C. G. Changes in chemical properties by use and management of an oxisol in the Amazon biome. **Revista Caatinga**, v.30, n.2, p.278-286, 2017.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas: 26 p. 2010.

SANTOS, C. C.; FERRAZ JUNIOR, A. S. L.; SÁ, S. O.; MUÑOZ GUTIÉRREZ, J. A.; BRAUN, H.; SARRAZIN, M.; BROSSARD, M.; DESJARDINS, T. Soil carbon stock and Plinthosol fertility in smallholder land-use systems in the eastern Amazon, Brazil, **Carbon Management**, v.9, n.6, p.655-664, 2018a.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018b. 356p.

SILVA JÚNIOR, C. H. L.; CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; DE MOURA, E. G.; VARGA, I. V. D.; MARTINEZ, C.; MARTINS, M. B. Amazon Forest on the edge of collapse in the Maranhão State, Brazil. **Land Use Policy**, v. 97, n.9, p.104806, 2020.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólica do solo (qCO₂)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia. 2007a. 6p. (Comunicado Técnico 99).

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia. 2007b. 6p. (Comunicado Técnico 98).

SILVA, M. S. L.; CAVALCANTI, A. C.; GOMES, T. C. A.; ANJOS, J. B. **Solos adensados e/ou compactados: identificação/diagnóstico e alternativas de manejo**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2001. 6p. (Embrapa Semiárido. Circular técnico 76).

SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; MARTINS, A. F.; TAVARES, D. D.; AMARAL, A. J. Fertility, carbon stock and aggregate stability of an Alfisol under integrated farming systems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.51, n.1, p.e66505, 2021a.

SILVA, M. O.; SANTOS, M. P.; SOUSA, A. C. P.; SILVA, R. L. V.; MOURA, I. A. A.; SILVA, R. S.; COSTA, K. D. S. Soil quality: biological indicators for sustainable management. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.1, p.6853-6875, 2021b.

SOUSA, H. M.; CORREA, A. R.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, S. S.; CAMPOS, D. T. S.; WRUCK, F. J. Dynamics of soil microbiological attributes in integrated crop-livestock systems in the cerrado-amazonônia ecotone. **Revista Caatinga**, v.33, n.1, p.9-20, 2020.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573p.

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

YEOMANS, J. C., BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.

4 CAPÍTULO II - CARBONO, NITROGÊNIO E FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA EM PASTAGENS RECUPERADAS NA AMAZÔNIA MARANHENSE

4.1 RESUMO

No Estado do Maranhão os solos são naturalmente ácidos, pobres em nutrientes, propensos à coesão e a processos erosivos, sendo comum após a retirada da cobertura vegetal natural o estabelecimento de pastagens, acarretando mudanças físicas, químicas e biológicas ao solo. Diante disso, este trabalho objetivou avaliar os impactos sobre os teores e estoques de C, N e frações granulométricas da matéria orgânica do solo (MOS) em pastagens com diferentes anos de recuperação, quando comparadas à floresta secundária. Foram avaliados os seguintes manejos: Floresta secundária (FS), Pastagem perene (PP), Pastagem recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) e Pastagem recuperada e formada há oito anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). Foram avaliados os teores e estoques de carbono orgânico total (COT e EstCOT) e nitrogênio total (NT e EstNT), C e N das frações granulométricas da MOS e o índice de manejo de carbono (IMC) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. A substituição da floresta secundária para ambiente de pastagem perene proporcionou alterações dos teores de C e N do solo, frações granulométricas da MOS e IMC. A recuperação da pastagem pelo consórcio milho + *Brachiaria* há oito anos contribuiu na melhoria da qualidade do solo, com resultados similares à floresta secundária, indicando que a forma e o tempo de recuperação contribuíram para aumentar a capacidade da pastagem em acumular o C e N no solo.

PALAVRAS-CHAVES: Manejo do solo, Frações granulométricas, Recuperação de pastagens.

CARBON, NITROGEN AND PHYSICAL FRACTIONS OF ORGANIC MATTER IN RECOVERED GRASSLANDS IN THE MARANHENSE AMAZON

ABSTRACT

In the State of Maranhão, soils are naturally acidic, poor in nutrients, prone to cohesion and erosion, and grassland are common after the removal of natural vegetation cover, causing physical, chemical and biological changes to the soil. Therefore, this study aimed to evaluate the impacts on the contents and stocks of C, N and granulometric fractions of soil organic matter (SOM) in grassland with different recovery years, when compared to secondary forest. The following managements were assessed: Secondary Forest (SF), Grassland (PP), Grassland recovered and formed five years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) and Grassland recovered and formed eight years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). The contents and stocks of total organic carbon (TOC and EstTOC) and total nitrogen (TN and EstTN), C and N of the SOM granulometric fractions and the carbon management index (CMI) in the layers 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30, and 0.30-0.40 m were evaluated. The replacement of the secondary forest for an environment of perennial grassland resulted in changes in soil C and N contents, SOM granulometric fractions and CMI. The grassland recovery by the corn + *Brachiaria* consortium eight years ago contributed to the improvement of soil quality, with similar results to the secondary forest, indicating that the form and recovery time contributed to increase the grassland capacity to accumulate C and N in the ground.

KEYWORDS: Soil management, Granulometric fractions, Pasture recovery.

4.2 INTRODUÇÃO

A Amazônia Maranhense apresenta os maiores níveis de desmatamento entre os estados da Amazônia Legal (SANTOS et al., 2018a; INPE, 2020), na qual 75% da vegetação natural foi desmatada, concentrando o restante em pequenas porções da floresta em áreas protegidas por lei (SANTOS et al., 2018a; CELENTANO et al., 2020). É comum após o desmatamento, o estabelecimento de pastagens em grandes áreas, ou lavouras temporárias, acarretando várias mudanças físicas, químicas e biológicas ao solo (SANTOS et al., 2018a).

No Estado do Maranhão, os solos são naturalmente ácidos, pobres em nutrientes, propensos à coesão e a processos erosivos, características negativas ampliadas pela adoção de práticas de manejo com baixo nível tecnológico, tais como, agricultura de corte e queima e a falta de correção e adubação do solo, ocasionando variabilidade na qualidade do solo (SANTOS et al., 2018a; CELENTANO et al., 2020). A adoção de práticas conservacionistas de manejo aliada a recuperação de áreas degradadas pode melhorar esse cenário pelo aumento no conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS) (BUNGENSTAB et al., 2019).

A MOS influencia a dinâmica dos atributos do solo, pois atua como fonte de energia, reservatório de nutrientes, formação e manutenção da estrutura do solo, portanto, sua redução afeta diretamente a qualidade e potencial dos solos (BELTRÁN et al., 2018; SANTOS et al., 2018a). O equilíbrio da MOS atua como dreno e fonte de carbono (C) e nitrogênio (N), sendo um importante reservatório e tendo sua dinâmica influenciada pelo tipo de preparo, sistema de manejo e condições ambientais (ASSUNÇÃO et al., 2019).

A realização de estudos das frações da MOS tem apresentado resultados promissores demonstrando os impactos dos manejos, mesmo com pouco tempo de adoção, ou em áreas onde não foram observadas diferenças nos teores totais de C e N, podendo-se elencar o fracionamento físico granulométrico, que tem como objetivo quantificar as formas lábeis e recalcitrantes dentro das frações texturais do solo (ROSSET et al., 2019; OZÓRIO et al., 2020; MORAES REGO et al., 2020).

A fração particulada ($>53 \mu\text{m}$ – associada à fração areia) é uma forma lábil da MOS por apresentar compostos orgânicos que não foram totalmente processados pelos microrganismos, estando ainda em fase de decomposição, sendo que seu aumento pode indicar melhorias sobre a liberação nutrientes, bem como sobre a fixação do C, proporcionando recuperação e/ou aumento das frações recalcitrantes ($<53 \mu\text{m}$ – associadas a fração silte e argila) (CONCEIÇÃO et al., 2014; BELTRÁN et al., 2018; LAVALLE et al., 2020). A fração recalcitrante apresenta forte ligação com a fração argila, formando complexos organominerais mais estáveis, colaborando para melhorias estruturais do solo e proteção física do C ao ataque

microbiano (CONCEIÇÃO et al., 2014; BELTRÁN, et al., 2018; LAVALLE et al., 2020; OZÓRIO et al., 2020).

Assim sendo, a MOS é o componente edáfico de maior sensibilidade à ação humana, e como consequência de sua variação, podem ser observados distúrbios das mais diversas ordens sobre os atributos do solo, funcionamento dos agroecossistemas e em seus serviços ecossistêmicos (BUNGENSTAB et al., 2019). Diante disso, entender essas mudanças nos teores de C e do N podem ajudar a elucidar e propor sistemas de manejos mais adaptáveis às realidades regionais.

Este trabalho parte da hipótese que a recuperação de pastagens com a integração lavoura pecuária aumentam os teores e estoques de C, N e frações granulométricas da MOS. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos sobre os teores e estoques de C, N e frações granulométricas da matéria orgânica do solo (MOS) em pastagens com diferentes anos de recuperação, quando comparadas à floresta secundária.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1 Local de Estudo

O local de estudo e suas características estão presentes no item 3.3.1 do capítulo I (pág. 17).

4.3.2 Sistemas Avaliados e Históricos de Uso

Os sistemas avaliados e seus respectivos históricos de uso estão apresentados no item 3.3.2 do capítulo I (pág. 18).

4.3.3 Coleta das Amostras de Solo e Avaliações

Em cada uma das quatro áreas avaliadas foram abertas cinco trincheiras com dimensões de 1 x 1 x 1 m, dispostas aleatoriamente. As amostras foram coletadas no período do verão, época na qual ocorrem os maiores volumes de precipitação colaborando com o teor de umidade próximo a capacidade de campo. Em paredes opostas da trincheira foram coletadas amostras indeformadas utilizando-se coletor Uhland com anéis volumétricos com volume conhecido de aço inox com 100 cm³, compreendendo as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m para determinação da densidade do solo (Ds) (TEIXEIRA et al., 2017).

Para as determinações de carbono (C) e nitrogênio (N) foram realizadas coletas de amostras deformadas em 3 pontos equidistantes de 10 metros em relação às paredes da

trincheira, com auxílio de trado tipo holandês, totalizando 12 amostras simples para compor 1 amostra representativa nas mesmas camadas anteriormente citadas.

O carbono orgânico total (COT) foi determinado através da oxidação via úmida, utilizando solução de dicromato de potássio 0,167 mol L⁻¹ e ácido sulfúrico concentrado, com aquecimento em bloco digestor, conforme Mendonça e Matos (2017) com adaptação da metodologia de Yeomans e Bremner (1988). Em relação ao nitrogênio total (NT), este foi determinado por destilação de Kjeldahl após digestão sulfúrica, conforme Mendonça e Matos (2017) adaptada de Bremner e Mulvaney (1982) e Tedesco et al. (1995).

Os estoques de COT e NT foram calculados através da seguinte equação:

$$\text{Est} = (\text{C ou N} \times \text{Ds} \times e) / 10$$

Onde: Est representa o estoque de C ou N em determinada camada expresso em Mg ha⁻¹; C ou N representa o teor na camada (g kg⁻¹); Ds representa a densidade do solo (g cm⁻³); e representa a espessura da camada do solo (cm).

Para comparar adequadamente os estoques entre os manejos, foi necessário fazer a comparação entre massas iguais de solo, ajustando os valores das camadas utilizadas nos cálculos, entretanto como não foram encontradas diferenças na Ds (Tabela 3), os estoques foram calculados sem necessidade da correção pela massa equivalente. De posse dos valores individuais para cada camada foi realizada a soma destes obteve-se o estoque total de COT e NT na seção de 0,00-0,40 m.

Tabela 3 - Densidade do solo (g cm⁻³) de um Plintossolo Argilúvico em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	Camadas (m)			
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40
FS	1,33±0,06 ^{ns}	1,41±0,03 ^{ns}	1,43±0,02 ^{ns}	1,48±0,01 ^{ns}
PP	1,42±0,03	1,43±0,02	1,43±0,04	1,45±0,03
P5	1,35±0,03	1,48±0,02	1,43±0,01	1,43±0,01
P8	1,37±0,03	1,43±0,02	1,43±0,02	1,44±0,03

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. ±: Erro padrão, ^{ns}: não significativo entre as áreas para cada camada pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Para o fracionamento físico-granulométrico da MOS, foram seguidos os procedimentos descritos por Mendonça e Matos (2017), adaptados de Cambardella e Elliott (1992), obtendo-se a fração particulada associada à areia. Em seguida foram quantificados os teores de C orgânico e N (COP e NP), conforme os mesmos procedimentos para o COT e NT.

Os teores de C orgânico e N associados aos minerais de silte e argila (COAM e NAM) foram obtidos pela diferença entre os teores totais do solo e aqueles obtidos nas frações particuladas (COAM = COT - COP; NAM = NT - NP). Além disso, foram realizadas as relações entre a fração particulada e os teores totais (COP/COT; NP/NT), a fim de entender a representação da fração lábil nos teores totais.

Foram calculados os estoques de C das frações físicas-granulométricas da matéria orgânica, a fim de serem empregados para determinar o índice de manejo de carbono (IMC) (BLAIR et al., 1995), conforme Conceição et al. (2014), tendo como objetivo medir as alterações causadas pelos diferentes manejos em comparação a floresta (referência não antropizada).

Para a determinação do IMC, calculou-se o índice de estoque de carbono (IEC), obtido da relação do EstCOT da área manejada e o EstCOT da área de floresta, utilizada como referência. A labilidade (L) da MOS pela relação entre os estoques de COP e COAM de cada manejo e o índice de labilidade (IL) obtido pela relação entre a L da área manejada e a L da área FS (referência). Em seguida o IMC de cada manejo foi calculado pela equação: $IMC = IEC * IL * 100$.

4.3.4 Análise Estatística

Os procedimentos estatísticos empregados são apresentados no item 3.3.4 do capítulo I (pág. 21).

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi observado na camada superficial os maiores teores de COT nas áreas FS e P8. Na camada 0,10-0,20 m as áreas P8 e PP evidenciaram os maiores teores de COT, sendo 30,63% e 24,83%, respectivamente, superiores ao encontrado na FS (Tabela 4). Nas duas últimas camadas, as áreas PP e P8 apresentaram os maiores teores de COT, 29,07% e 19,73% e 35,88% e 26,91%, respectivamente, quando comparado a FS.

Na camada 0,00-0,10 m os resultados de COT da FS devem-se a constante deposição de resíduos orgânicos ao solo (ASSUNÇÃO et al., 2019; OZÓRIO et al., 2020). Na área P8 a recuperação proporcionou acumulação de COT contribuindo para que os teores não diferiram da FS, sendo 36% superior à quantidade de C da área PP. Em profundidade (0,20-0,30 e 0,30-0,40 m) as áreas PP e P8 apresentaram os maiores teores de COT quando comparado a FS (Tabela 4), isso pode ser devido a velocidade de crescimento e deposição das raízes das plantas forrageiras (OLIVEIRA et al., 2018; SARTO et al., 2020; BIELUCZYK et al., 2020).

Tabela 4 - Teores de carbono orgânico total (COT) e carbono (C) das frações granulométricas da matéria orgânica do solo em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	COT	COP	COAM	COP/COT
	----- (g kg ⁻¹) -----			%
0,00-0,10 m				
FS	9,65±0,17 a	4,11±0,22 a	5,54±0,23 a	42,64±2,1 a
PP	7,27±0,19 b	2,41±0,39 b	4,85±0,38 a	33,17±5,2 a
P5	7,66±0,14 b	3,14±0,19 b	4,52±0,28 a	41,11±2,9 a
P8	9,86±0,26 a	4,29±0,37 a	5,57±0,56 a	43,86±4,6 a
0,10-0,20 m				
FS	4,31±0,06 c	1,41±0,18 a	2,90±0,20 c	32,71±4,3 a
PP	5,38±0,06 a	0,72±0,03 b	4,66±0,07 a	13,42±0,6 b
P5	4,68±0,12 b	1,41±0,12 a	3,27±0,19 c	30,08±2,9 a
P8	5,63±0,11 a	1,72±0,29 a	3,91±0,25 b	30,52±4,9 a
0,20-0,30 m				
FS	3,75±0,06 c	1,20±0,11 a	2,54±0,16 c	32,32±3,4 a
PP	4,84±0,07 a	0,66±0,18 b	4,18±0,22 a	13,68±3,8 b
P5	4,05±0,08 c	1,10±0,19 a	2,95±0,25 bc	27,42±4,9 a
P8	4,49±0,10 b	1,31±0,05 a	3,19±0,11 b	29,16±1,4 a
0,30-0,40 m				
FS	3,79±0,32 b	0,97±0,15 a	2,82±0,17 c	25,05±1,90 a
PP	5,15±0,06 a	0,41±0,12 a	4,73±0,17 a	8,14±2,5 b
P5	4,06±0,05 b	0,88±0,16 a	3,17±0,19 bc	21,89±4,1 a
P8	4,81±0,08 a	0,91±0,19 a	3,90±0,27 b	19,24±4,1 ab

Nota. COP: Carbono orgânico particulado, COAM: Carbono orgânico associados aos minerais de silte e argila. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, para cada camada, não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Vários trabalhos na literatura observaram resultados similares em relação aos teores de COT em pastagem quando comparado a áreas de floresta, indicando que pastagens perenes em função do sistema radicular com alta velocidade de deposição e exploração do solo, e quando bem manejadas, podem proporcionar aumentos nos teores e estoques de C do solo que equiparam-se a vegetação nativa (REIS et al. 2018; SANTOS et al., 2018a; ROSSET et al., 2019; SARTO et al., 2020; MARTINS et al., 2020; BASTOS et al., 2021).

Nas áreas FS, camada 0,00-0,10 m, e P8, 0,00-0,10 m a 0,20-0,30 m, foram observados os maiores teores de COP, enquanto na última camada não foram encontradas diferenças entre os manejos. Para a relação COP/COT não houveram diferenças entre os manejos em 0,00-0,10 m, ao passo que nas demais camadas a área PP apresentou as menores contribuições do C na

fração lábil em relação ao COT (Tabela 4), ou seja, menor deposição de resíduo orgânico lábil no solo.

Por ser uma fração lábil, facilmente decomponível, o COP é empregado como indicador da deposição de resíduos orgânicos sobre o solo (ROSSET et al., 2019). Diante disso, os baixos teores de COP e sua proporção dentro do COT na área PP é um indicativo de menor deposição de resíduos novos, possivelmente proporcionada pela perda do vigor das plantas (PEREIRA et al., 2020) após 20 anos de implantação. Observando as áreas P5 e P8 seria possível inferir que a recuperação da pastagem contribuiu sobre os incrementos dos teores COP e sua proporção dentro do COT, não havendo diferenças da FS, em diferentes camadas, devido ao estabelecimento de novas plantas e ao manejo adotado.

Em 0,00-0,10 m não houve diferença entre as áreas para COAM (Tabela 4). Já nas demais camadas, a área PP apresentou os maiores teores, com incrementos de 60,69, 64,57 e 67,73%, respectivamente, na acumulação de C nesta fração quando comparado a FS (Tabela 4). Esse incremento da fração recalcitrante pode estar relacionado ao conteúdo de silte, observado pela análise granulometria (Tabela 1), possivelmente auxiliando sobre a proteção do C ao ataque dos microrganismos, estabilizando a longo prazo contra a mineralização, evidenciando a importância do silte e argila, na proteção do C, especialmente em solos tropicais (CONCEIÇÃO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016; BELTRÁN et al., 2018; LAVALLE et al., 2020).

Para o NT e NAM, ao longo das camadas avaliadas não foram observadas diferenças entre as áreas PP e P8, e os menores teores foram encontrados na área P5 (Tabela 5). Os resultados na área P5 pode estar associada ao processo de preparo inicial no processo de recuperação da pastagem que, por ser uma região tropical e o solo de textura arenosa ocasionou rápida degradação de compostos nitrogenados solo (CAMPOS et al., 2016; PEGORARO et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2018). Observando os resultados da área P8, que sofreu o mesmo procedimento de recuperação (Tabela 2), é possível inferir que um maior tempo seria necessário para verificar a ocorrência de acumulação de C e N na área P5, podendo equipara-se ao observado na FS.

Para o NP foi verificado diferenças na camada 0,20-0,30 m, sendo as áreas PP e P5 com maiores teores (Tabela 5). Já pela relação NP/NT, a área P5 apresentou em todas as camadas as maiores contribuições de deposição de N na fração lábil em relação ao NT, ou seja, maior deposição de resíduo orgânico lábil rico em N ao solo (Tabela 5). Esse aumento de 12,02 a 26,82 da participação da fração lábil sobre a fração total na área P5, quando comparado aos demais manejos, poderia reafirmar que à medida que forem realizados a deposição de resíduos

vegetais e os dejetos animais (esterco + urina) poderá ocorrer a recuperação dentro dos teores totais e fração recalcitrante, uma vez que os dejetos animais podem representar até 50% do NT ao solo em sistemas de pecuária (OLIVEIRA et al., 2018).

Tabela 5 - Teores de nitrogênio total (NT), nitrogênio das frações granulométricas da matéria orgânica do solo e relação fração lábil por total em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	NT	NP	NAM	NP/NT
	----- (g kg ⁻¹) -----			%
0,00-0,10 m				
FS	1,01±0,04 ab	0,26±0,01 a	0,75±0,03 bc	25,73±0,7% ab
PP	1,11±0,07 a	0,22±0,02 a	0,89±0,06 ab	19,87±1,8% bc
P5	0,86±0,11 b	0,22±0,02 a	0,64±0,11 c	26,82±3,1% a
P8	1,15±0,03 a	0,21±0,02 a	0,94±0,01 a	17,95±1,6% c
0,10-0,20 m				
FS	0,70±0,04 ab	0,09±0,01 a	0,61±0,04 ab	13,01±1,6% ab
PP	0,77±0,07 a	0,09±0,01 a	0,68±0,06 a	11,72±1,0% b
P5	0,57±0,08 b	0,09±0,01 a	0,48±0,07 b	15,50±1,1% a
P8	0,83±0,03 a	0,09±0,01 a	0,74±0,03 a	10,48±0,3% b
0,20-0,30 m				
FS	0,70±0,04 ab	0,06±0,00 b	0,63±0,05 ab	9,40±1,4% b
PP	0,75±0,09 a	0,07±0,00 ab	0,68±0,09 a	9,25±1,0% b
P5	0,52±0,07 b	0,08±0,00 a	0,44±0,07 b	15,27±1,6% a
P8	0,85±0,05 a	0,05±0,00 c	0,80±0,05 a	5,91±0,3% b
0,30-0,40 m				
FS	0,76±0,06 a	0,05±0,00 a	0,71±0,06 a	6,55±0,9% b
PP	0,79±0,06 a	0,06±0,00 a	0,73±0,06 a	7,32±1,0% b
P5	0,50±0,06 b	0,06±0,00 a	0,44±0,06 b	12,02±1,4% a
P8	0,87±0,03 a	0,06±0,01 a	0,82±0,00 a	6,38±1,0% b

Nota. NP: Nitrogênio particulado, NAM: Nitrogênio associados aos minerais de silte e argila. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, para cada camada, não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Foi observado em todas as áreas que o N da fração lábil apresenta participação de 5% a 26% da composição do NT, estando a maior parte na fração recalcitrante, podendo ser indicativo de proteção do complexo organomineral e maior resistência deste em ser consumido pelos microrganismos (CANTARELLA, 2007; CONCEIÇÃO et al., 2014), mesmo em condições em solos de textura mais arenosa (Tabela 1).

Silva et al. (2011), avaliando as frações lábeis e recalcitrantes da MOS sobre diferentes manejos também verificaram as maiores concentrações de N na fração mais recalcitrante da

MOS. Esse fato pode ser atribuído à maior produção de resíduos vegetais com maior relação C/N e lignina/N, as quais possuem decomposição mais lenta do resíduo e favorecem o aumento de frações recalcitrantes no solo (SILVA; MENDONÇA, 2007; BIELUCZYK et al., 2020).

Nos estoques de carbono orgânico total (EstCOT) e nitrogênio total (EstNT) foi observado que a recuperação da pastagem com oito anos proporcionou incremento de 4,97 e 0,78 Mg ha⁻¹, respectivamente, quando comparado à vegetação nativa, isso indicaria uma taxa de acúmulo de 0,621 e 0,098 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C e N ao solo, respectivamente (Tabela 6). Tais resultados da área P8 para os estoques de C e N corroboram com os observando individualmente nas camadas dentro dos teores de COT e NT (Tabelas 4 e 5), sendo esses valores elevados relacionados à formação de grande massa de material vegetal devido ao rápido crescimento e cobertura do solo, deposição de resíduos dos animais, conseqüentemente estimulação da biomassa microbiana e a rizodeposição elevada com distribuição uniforme, favorecendo o aumento dos teores e estoques de C e N no solo (OLIVEIRA et al., 2016; SAMPAIO et al., 2020; BIELUCZYK et al., 2020).

Tabela 6 - Estoques de carbono orgânico e nitrogênio total, taxas de acúmulo e perdas na seção de 0,00-0,40 m de profundidade no solo em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	EstCOT (Mg ha ⁻¹)	Variação		
		EstCOT (Mg ha ⁻¹)	Tempo (ano)	Taxa de acúmulo ou perda (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
FS	29,92 ±0,67 c	-	-	-
PP	32,46 ±0,27 b	3,30	49	0,052
P5	28,90 ±0,16 c	-1,03	5	-0,206
P8	34,89 ±0,48 a	4,97	8	0,621

Áreas	EstNT (Mg ha ⁻¹)	Variação		
		EstNT (Mg ha ⁻¹)	Tempo (ano)	Taxa de acúmulo ou perda (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
FS	4,45 ±0,21 a	-	-	-
PP	4,90 ±0,38 a	0,44	49	0,009
P5	3,46 ±0,42 b	-0,99	5	-0,198
P8	5,24 ±0,17 a	0,78	8	0,098

Nota. EstCOT: Estoque de carbono orgânico total, EstNT: Estoque de nitrogênio total. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Pegoraro et al. (2018), observaram ganhos nos EstCOT e EstNT, quando a vegetação nativa foi substituída por pastagem com três anos de implantação corroborando, portanto, com

o comportamento observado no presente estudo em profundidade devido a ação das raízes para a acumulação de C e N.

São apresentados na Figura 2 os resultados em relação às alterações causadas pelos manejos sobre o IMC. É possível observar que para o IEC, os valores superiores a 1 indicam incremento dos teores de COT em relação a área de referência, demonstrando o potencial de incremento no conteúdo de C no solo, sendo observados nas áreas P8 e PP os maiores valores de IEC (Figura 2A).

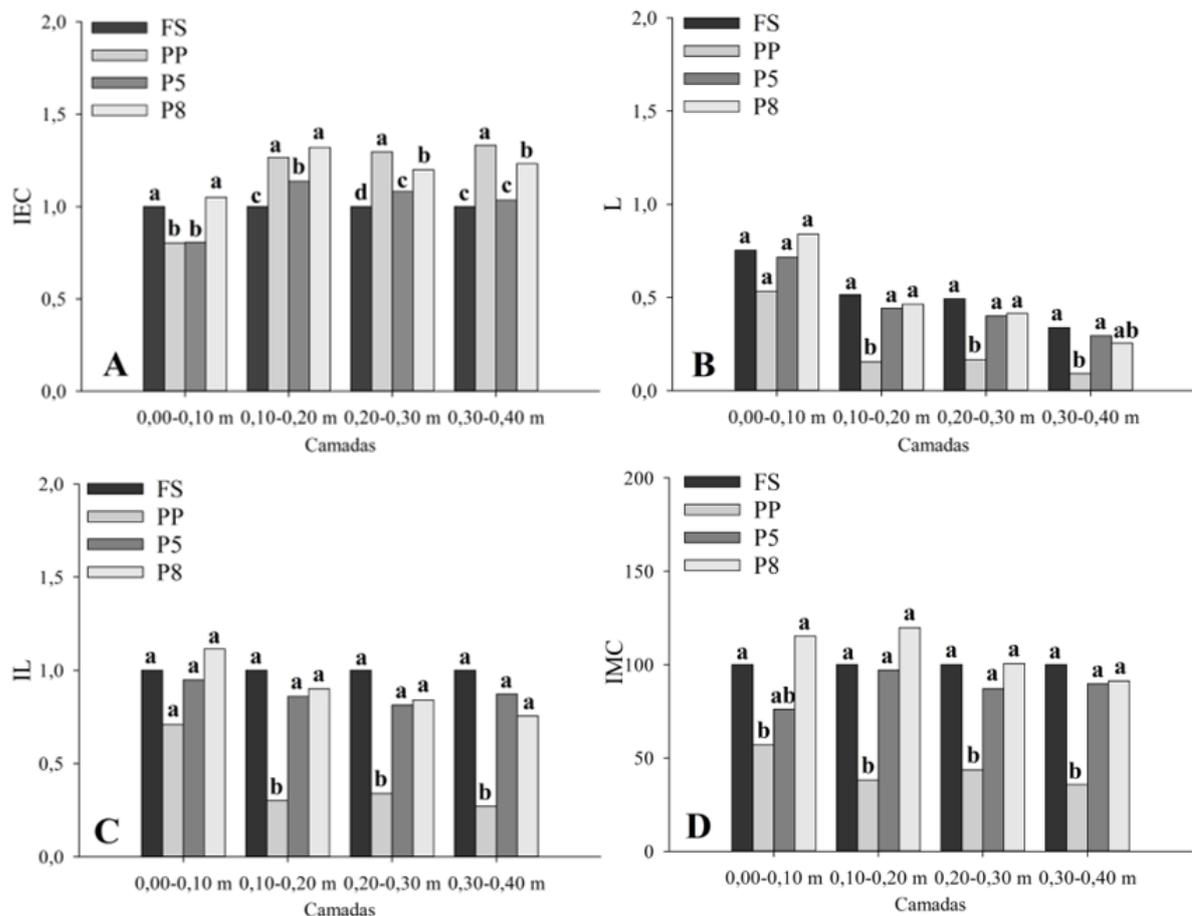


Figura 2 - Índices de estoque de carbono (IEC), labilidade (L), índice de labilidade (IL) e índice de manejo do carbono (IMC) do solo em diferentes manejos na Amazônia Maranhense. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de mesma letra minúscula na camada não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

As diferenças da área FS em relação a P5 e PP em superfície estão relacionados a deposição e acumulação de C, comportamento observado nos teores de COT e valores de EstCOT, reafirmando a diferença entre os manejos na camada superficial, uma vez que tal

índice é obtido da relação entre os EstCOT dos manejos pela referência. Já em profundidade, a FS apresentou os menores valores quando comparado aos demais manejos, possivelmente devido às características das plantas presentes (Tabela 2), como a densidade e quantidade de plantas e a própria velocidade de deposição de C pelas raízes, na qual plantas forrageiras têm maior capacidade de exploração radicular no solo (OLIVEIRA et al., 2018; SARTO et al., 2020; BIELUCZYK et al., 2020). Rosset et al. (2019), também observaram potencial acúmulo de C do sistema radicular de pastagens após longo cultivo, equiparando os valores ao encontrado em área de vegetação nativa em profundidade.

Para L não houve diferença entre as áreas na camada 0,00-0,10 m, enquanto nas demais camadas, os menores valores foram observados na PP (Figura 2B). A menor L encontrada na área PP demonstra a diferença sobre a qualidade do C inserido ao solo, pois esta variável é obtida da relação entre as frações lábil e recalcitrante, indicando um desequilíbrio destas frações da MOS (BLAIR et al., 1995).

A L é um indicador da qualidade do solo, servindo como balizador para verificar os efeitos dos sistemas de produção sobre o solo (CONCEIÇÃO et al., 2014; ROSSET et al., 2019; OZÓRIO et al., 2020; MORAES REGO et al., 2020). Portanto, além da preservação das formas recalcitrantes de C é necessário a entrada de resíduos orgânicos para que o processo de decomposição possa ser efetuado de maneira eficiente, uma vez que quanto maiores são as entradas de C ao solo, maior é a capacidade do mesmo em entrar em equilíbrio devido a maior atividade dos microrganismos.

Os menores valores de IL foram observados na área de PP, com exceção na camada superficial, que não houveram diferenças entre os manejos (Figura 2C). Tais resultados reforçam que na área PP está ocorrendo redução sobre a biodisponibilidade do C, portanto, ambiente com menor proteção ao C lábil do solo em relação a área referência ou menor aporte de resíduos novos (BLAIR et al., 1995; OZÓRIO et al., 2020). Necessitando a adoção de práticas como a recuperação de pastagem aliada a sistemas conservacionistas, a fim de renovar as plantas forrageiras e melhorar a deposição de resíduos ao solo, pois os sistemas agrícolas conservacionistas têm grande influência sobre os estoques de MOS, podendo manter ou aumentar esses estoques em relação à vegetação nativa (ROSSET et al., 2019; OZÓRIO et al., 2020; SARTO et al., 2020; BIELUCZYK et al., 2020).

Para o IMC, os menores e maiores valores foram observados nas áreas PP e P8, respectivamente, este último não diferindo da FS e P5, demonstrando que a prática de recuperação da pastagem com a integração com *Brachiaria* proporcionou melhorias quantitativas e qualitativas no C (Figura 2D). Nas áreas de P5 e P8, a adição de resíduos

orgânicos com alto teor de lignina, que por sua vez torna o ataque microbiano mais lento, aliado à constante deposição, a não perturbação do solo e a entrada de dejetos dos animais (BUNGENSTAB et al., 2019; SILVA et al., 2020), contribuíram para os maiores valores observados em IMC, equiparando-as a área de FS. Esses resultados do IMC indicam melhorias sobre a capacidade de retenção de água, fertilidade do solo, estabilidade de agregados e atividade biológica, com consequente maior resistência a sofrer com processos erosivos (ROSSET et al., 2019; SILVA et al., 2020).

4.5 CONCLUSÕES

A substituição da floresta secundária para pastagem perene em cultivo tradicional da região proporciona redução dos teores e estoques de carbono orgânico total e carbono das frações das granulométricas da matéria orgânica do solo na camada superficial e comportamento inverso em profundidade. Já em relação aos teores e estoques de nitrogênio do solo e frações granulométricas da matéria orgânica do solo não foram observadas modificações significativas.

O índice de manejo de carbono foi eficiente em demonstrar que mesmo a pastagem perene apresentando teores em profundidade elevados no carbono orgânico total e frações recalcitrantes, estaria ocorrendo desequilíbrio em relação a qualidade e disponibilidade de resíduos orgânicos lábil.

A recuperação e formação da pastagem via integração com *Brachiaria* após oito anos da integração lavoura-pecuária, mostrar-se como alternativa assertiva para potencializar o acúmulo de carbono e nitrogênio, além de melhorar a qualidade da matéria orgânica do solo, proporcionando resultados que podem ser equiparáveis e, ou, melhores que ao ambientes de floresta secundária.

4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. J.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2014.

ASSUNÇÃO, S. A., PEREIRA, M. G., ROSSET, J. S., BERBARA, R. L. L., GARCIA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Science of The Total Environment**, v.658, n.3, p.901-911, 2019.

BASTOS, A. S.; SANQUETTA, C. R.; MANIESI, V.; SANQUETTA, M. N. I.; CORTE, A. P. D. Amazon plinthosols: carbon stocks and physical properties under different land uses. **Ciência Florestal**, v.31, n.2, p.749-765, 2021.

BELTRÁN, M. J., SAINZ-ROZAS, H., GALANTINI, J. A., ROMANIUK, R. I., BARBIERI, P. Cover crops in the Southeastern region of Buenos Aires, Argentina: effects on organic matter physical fractions and nutrient availability. **Environmental Earth Sciences**, v.77, n.6, p.1-11, 2018.

BIELUCZYK, W., PICCOLO, M. C., PEREIRA, M. G., MORAES, M. T., SOLTANGHEISI, A., BERNARDI, A. C. C., PEZZOPANE, J. R. M., OLIVEIRA, P. P. A., MOREIRA, M. Z., CAMARGO, P. B., DIAS, C. T. S., BATISTA, I., CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v.371, n.6, p.114368, 2020.

BLAIR, G. J., LEFROY, R. D. B., LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.46, n.7, p.1459-1466, 1995.

BREMNER, J. M., MULVANEY, C. S. **Nitrogen Total**. In: Page A. L. (Ed.) Methods of soil analysis. Part 2. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p.595-624.

BUNGENSTAB, D. J., ALMEIDA, R. G., LAURA, V. A., BALBINO, L.C., FERREIRA, A. D. **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília: Embrapa, 2019. 835 p.

CAMBARDELLA, C. A., ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, n.3, p.777-783, 1992.

CAMPOS, M. C. C., SOARES, M. D. R., NASCIMENTO, M. F., SILVA, D. M. P. Carbon storage in soil and aggregates of Inceptisols under different land use management systems in southern Amazonas. **Revista Ambiente & Água**, v.11, n.2, p.339-349, 2016.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B., NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p.375-470.

CELENTANO, D., ROUSSEAU, G. X., PAIXÃO, L. S., LOURENÇO, F., CARDOZO, E. G., RODRIGUES, T. O., SILVA, H. R., MEDINA, J., SOUSA, T. M. C., ROCHA, A. E., REIS, F. O. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, v.94, n.5, p.1781-1792, 2020.

CONCEIÇÃO, P. C., BAYER, C., DIECKOW, J., SANTOS, D. C. Physical fractionation of organic matter and carbon management index of an Alfisol subjected to conservation management systems. **Ciência Rural**, v.44, n.5, p.794-800, 2014.

INPE. NATIONAL INSTITUTE FOR SPACE RESEARCH. **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites - sistemas Prodes, Deter, Degrad e Queimadas**. São José do Campos: INPE, 2020. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>> Acesso em: 20 de agosto de 2021.

LAVALLE, J. M., SOONG, J. L., COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v.26, n.10, p.261-273, 2020.

MARANHÃO. **Atlas do Maranhão**. Secretaria de Estado do Planejamento e Orçamento, Núcleo Geoambiental UEMA. São Luís: SEPLAN, 2013. 90 p.

MARTINS, L. F. B. N., TROIAN, D., ROSSET, J. S., SOUZA, C. B. S., FARIAS, P. G. S., OZÓRIO, J. M. B., MARRA, L. M., CASTILHO, S. C. P. Soil carbon stock in different uses in the southern cone of Mato Grosso do Sul. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.7, n.4, p.86-94, 2020.

MENDONÇA, E. S., MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. second ed., Viçosa: Gefert, 2017. 221p.

MORAES REGO, C. A. R.; OLIVEIRA, P. S. R.; PIANO, J. T.; EGEWARTH, J. F.; EGEWARTH, V. A.; HERRERA, J. L.; GONCALVES JUNIOR, A. C. Chemical properties and physical fractions of organic matter in oxisols under integrated agricultural production systems. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 7, p. 81-89, 2020.

OLIVEIRA, S. P., CÂNDIDO, M. J. D., WEBER, O. B., XAVIER, F. A. S., ESCOBAR, M. E. O., OLIVEIRA, T. S. Conversion of forest into irrigated pasture I. Changes in the chemical and biological properties of the soil. **Catena**, v.137, n.2, p.508-516, 2016.

OZÓRIO, J. M. B., ROSSET, J. S., SCHIAVO, J. A., SOUZA, C. B. S., FARIAS, P. G. S., OLIVEIRA, N. S., MENEZES, R. S., PANACHUKI, E. Physical fractions of organic matter and mineralizable soil carbon in forest fragments of the Atlantic Forest. **Revista Ambiente & Água**, v.15, n.6, p.2601, 2020.

PEGORARO, R. F, MOREIRA, C. G, DIAS, D. G, SILVEIRA, T. C. Carbon and nitrogen stocks in the soil and humic substances of agricultural crops in the semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v.49, n.4, p.574-583, 2018.

PEREIRA, M. A., COSTA, F. P., MONTAGNER, D. B., EUCLIDES, V. P. B., ARAÚJO, A. R., BARBOSA, R. A., SOUZA, J. A. B. A. **Pastagens: condicionantes econômicos e seus efeitos nas decisões de formação e manejo**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2020. 24p. (Comunicado técnico, 150).

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Austria: Vienna, 2021.

RASSE, D. P., RUMPEL, C., DIGNAC, M. F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. **Plant Soil**, v.269, v.1-2, p.341-356, 2005.

REIS, V. R. R., DEON, D. S., MUNIZ, L. C., GARCIA, U. S., CANTANHÊDE, I. S. L., REGO, C. A. R. M., COSTA, J. B., MARQUES, E. O. Soil chemical attributes under crop-livestock-forest integration system and in different land uses in mata dos cocais region. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.4, p.370-380, 2018.

RIOS, L. **Estudos de Geografia do Maranhão**. São Luís: Gráphis Editora, 2001. 50 p.

ROSSET, J. S., LANA, M. C., PEREIRA, M. G., SCHIAVO, J. A., RAMPIM, L., SARTO, M. V. M. Organic matter and soil aggregation in agricultural systems with different adoption times. **Semina: Ciências Agrárias**, v.40, n.6, p.3443-3460, 2019.

SAMPAIO, A. C. F., SILVA, E. S., VALE JÚNIOR, J. F., SILVA, E. E., SANTOS, B. R., OLIVEIRA, R. F. Granulometry and carbon and nitrogen contents at different depths of a soil under integrated production systems. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v.16, n.2, p.58-63, 2020.

SANTOS, C. C., FERRAZ JUNIOR, A. S. L., SÁ, S. O., MUÑOZ GUTIÉRREZ, J. A., BRAUN, H., SARRAZIN, M., BROSSARD, M., DESJARDINS, T. Soil carbon stock and Plinthosol fertility in smallholder land-use systems in the eastern Amazon, Brazil, **Carbon Management**, v.9, n.6, p.655-664, 2018a.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., ALMEIDA, J. A., ARAUJO FILHO, J. C., OLIVEIRA, J. B., CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. fifth ed. Brasília: Embrapa, 2018b. 356 p.

SARTO, M. V. M., BORGES, W. L. B., BASSEGIO, D., PIRES, C. A. B., RICE, C. W., ROSOLEM, C. A. Soil microbial community, enzyme activity, C and N stocks and soil aggregation as affected by land use and soil depth in a tropical climate region of Brazil. **Archives of Microbiology**, v.202, n.6, p.2809-2824, 2020.

SILVA, E., LOURENTE, E. P. R., MARCHETTI, M. E., MERCANTE, F. M., FERREIRA, A. K. T., FUJII, G. C. Labile and recalcitrant fractions of soil organic matter under integrated crop-livestock system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1321-1331, 2011.

SILVA, I. R., MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B., NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p.275-374.

SILVA, J. R. M., ENSINAS, S. C., BARBOSA, G. F., REZENDE, J. V. O., BARRETA, P. G. V., ZUFFO, A. M. Total organic carbon and the humic fractions of the soil organic matter in silvopastoral system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.15, n.2, p.e6874, 2020.

TEDESCO, J. M., WOLKWEISS, S. J., BOHNEN, H. **Análise de solo, planta e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 156p. (Boletim Técnico, 5)

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análises de solo**. third ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574p.

TROIAN, D., ROSSET, J. S., MARTINS, L. F. B. N., OZÓRIO, J. M. B., CASTILHO, S. C. P., MARRA, L. M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.13, n.4, p.1447-1469, 2020.

YEOMANS, J. C., BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.

5 CAPÍTULO III - SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E FRAÇÕES OXIDÁVEIS DA MATÉRIA ORGÂNICA EM DIFERENTES AMBIENTES NA AMAZÔNIA MARANHENSE

5.1 RESUMO

O manejo do solo realizado de forma a não respeitar a aptidão e capacidade de uso tem levado a degradação do solo em diferentes níveis, na qual tem resultado na incapacidade de manutenção de parâmetros produtivos e sustentabilidade. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivos avaliar os teores de carbono (C) sobre as frações químicas e oxidáveis do solo em pastagens com diferentes anos de recuperação, quando comparadas à floresta secundária. Foram avaliados os seguintes manejos: Floresta secundária (FS), Pastagem perene (PP), Pastagem recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) e Pastagem recuperada e formada há oito anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). Foram determinados os teores de C das frações oxidáveis da matéria orgânica (F1, F2, F3 e F4) e os teores e estoques das substâncias húmicas (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos, humina) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. Os maiores teores de C das substâncias húmicas foram observados na FS em superfície, assim como pelas áreas P8 e P5, enquanto em profundidade as áreas P8 e P5 apresentam as maiores contribuições. Em relação às frações oxidáveis foram verificadas na área P8 as maiores contribuições dentro da F1 e F3 diferindo das demais em parte das camadas analisadas. A recuperação de pastagem após oito anos proporcionou melhorias sobre a acumulação de carbono ao solo nas frações oxidáveis e substâncias húmicas.

PALAVRAS-CHAVE: Carbono do solo, Fracionamento químico, Manejo do solo, Recuperação de pastagem.

HUMIC SUBSTANCES AND OXIDIZABLE FRACTIONS OF ORGANIC MATTER IN DIFFERENT ENVIRONMENTS IN THE MARANHENSE AMAZON

ABSTRACT

Soil management carried out in a way that does not respect the suitability and capacity for use has led to soil degradation at different levels, which has resulted in the inability to maintain productive parameters and sustainability. Therefore, the present work aims to evaluate the carbon (C) contents of the chemical and oxidizable fractions of soil organic matter in grassland with different recovery years, when compared to secondary forest. The following managements were assessed: Secondary Forest (SF), Grassland (PP), Grassland recovered and formed five years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) and Grassland recovered and formed eight years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). The C contents of the oxidizable organic matter fractions (F1, F2, F3 and F4) and the contents and stocks of humic substances (fulvic acids, humic acids, humin) in the 0.00-0.10.0 layers were determined. .10-0.20, 0.20-0.30 and 0.30-0.40 m. The highest C contents of the humic substances were observed in the FS on the surface, as well as in the areas P8 and P5, while in depth the areas P8 and P5 present the greatest contributions. In relation to the oxidizable fractions, the largest contributions within the F1 and F3 were verified in the P8 area, differing from the others in part of the analyzed layers. Grassland recovery after eight years provided improvements on soil carbon accumulation in oxidizable fractions and humic substances.

KEYWORDS: Soil carbon, Chemical fractionation, Soil management, Pasture recovery.

5.2 INTRODUÇÃO

A intensificação do uso e manejo do solo realizado de forma a não respeitar a aptidão e capacidade de uso tem levado muitas áreas ao processo de degradação, na qual tem resultado na incapacidade de manutenção de parâmetros produtivos e sustentabilidade. A fim de verificar essas mudanças, a variação no acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS) pode ser usado como indicador de qualidade, em virtude da sua sensibilidade às alterações que determinado sistema de manejo adotado pode proporcionar (ROSSET et al., 2016; MORAES REGO et al., 2020; PIANO et al., 2020).

A MOS apresenta papel fundamental na manutenção da qualidade do solo, influenciando direta e indiretamente diversas características, e nas zonas tropicais têm demonstrado maior importância graças a seu papel sobre os atributos edáficos, de modo que sua redução está relacionada à degradação química, física e biológica do solo (ROSSET et al., 2016). A maioria dos estudos sobre MOS enfatiza a influência de diferentes práticas de manejo sobre os teores e estoques de C no solo, e a forma mais específica de avaliar as mudanças seria relacionada ao entendimento da estabilidade do C no solo (MACHADO et al., 2019; MORAIS et al., 2021).

Entre as formas de entender a dinâmica e a estabilidade da MOS pode ser feita através de técnicas de fracionamento, como o químico (SWIFT, 1996) e oxidável (CHAN et al., 2001), que são importantes ferramenta mais sensíveis e capazes de detectar mudanças associadas a diferentes formas de uso e/ou manejo do solo e das espécies vegetais (PIANO et al., 2020).

No fracionamento químico são obtidas as substâncias húmicas (ácidos fúlvicos - AF, ácidos húmicos - AH e humina - HUM) que constituem no compartimento da MOS de maior reatividade apresentando de 70 a 90% do conteúdo de C no solo, por isso encontram-se envolvidas na maioria das reações químicas edáficas, fortemente relacionadas à fertilidade do solo (ROSA et al., 2017; MENDONÇA; MATOS, 2017). Enquanto pelo fracionamento oxidável obtém-se quatro frações (F1 a F4) com graus decrescentes de oxidação, sendo que as duas primeiras estão relacionadas com a disponibilidade de nutrientes e as duas últimas com compostos de maior estabilidade química e molecular, conseqüentemente, tem-se informações referentes a labilidade e a resistência do C à degradação (GUARESCHI et al., 2013; ROSSET et al., 2016).

O entendimento das alterações do C das diferentes frações da MOS possibilita a mensuração do grau de qualidade do solo, auxiliando na detecção dos possíveis impactos causados por determinado sistema de manejo no ambiente edáfico. Diante do exposto, este trabalho parte da hipótese que a recuperação da pastagem modifica de forma benéfica as substâncias húmicas e as frações oxidáveis da matéria orgânica do solo. Portanto, esse trabalho

teve como objetivo avaliar os teores de carbono (C) sobre as frações químicas e oxidáveis do solo em pastagens com diferentes anos de recuperação, quando comparadas à floresta secundária.

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

5.3.1 Local de Estudo

O local de estudo e suas características estão presentes no item 3.3.1 do capítulo I (pág. 17).

5.3.2 Sistemas Avaliados e Históricos de Uso

Os sistemas avaliados e seus respectivos históricos de uso estão apresentados no item 3.3.2 do capítulo I (pág. 18).

5.3.3 Coleta das Amostras de Solo e Avaliações

Em cada sistema de uso do solo foram abertas cinco trincheiras com dimensões de 1 x 1 x 1 m, dispostas aleatoriamente nas áreas. As amostras foram coletadas no período do verão, época na qual ocorrem os maiores volumes de precipitação colaborando com o teor de umidade próximo a capacidade de campo. Em paredes opostas da trincheira foram coletadas amostras indeformadas utilizando-se coletor Uhland com anéis volumétricos com volume conhecido de aço inox com 100 cm³, compreendendo as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m para determinação da densidade do solo (Ds) (TEIXEIRA et al, 2017).

Para o fracionamento da MOS foram realizadas coletas de amostras deformadas em tres pontos equidistantes de dez metros em relação a cada parede da trincheira, com auxílio de trado tipo holandês, totalizando doze amostras simples para compor uma amostra representativa nas mesmas camadas anteriormente citadas. As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2 mm de malha, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

A partir da TFSA foi realizado a determinação do carbono orgânico total (COT) através da oxidação via úmida utilizando solução de dicromato de potássio 0,167 mol L⁻¹ e ácido sulfúrico concentrado, com aquecimento em bloco digestor, conforme descrito por Mendonça e Matos (2017) adaptado da metodologia de Yeomans e Bremner (1988).

As substâncias húmicas (fracionamento químico) foram obtidas pela extração e separação por meio da solubilidade diferencial da matéria orgânica em meio básico ou ácido (ácidos fúlvicos e húmicos) e o resíduo (humina) realizada pelo método proposto pela

International Humic Substances Society (IHSS), descrito por Swift (1996) com adaptações para a realidade dos solos brasileiro por Mendonça e Matos (2017), separando as frações em ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HUM). Após a partição foram determinados os teores carbono das mesmas, conforme descrito por Mendonça e Matos (2017), posteriormente foi calculado o extrato alcalino (EA) ($EA = AH + AF$) e as relações AH/AF e EA/HUM para verificação dos processos de humificação da MOS, na qual na primeira relação indica a mobilidade do carbono no solo e o grau de humificação e a segunda a possível iluviação de matéria orgânica no perfil do solo (BENITES et al., 2003).

Foram calculados os estoques das substâncias húmicas através da seguinte equação:

$$Est = (C \times Ds \times e) / 10$$

Onde: Est representa o estoque de carbono em determinada camada expresso em $Mg \text{ ha}^{-1}$; C representa o teor na camada ($g \text{ kg}^{-1}$); Ds representa a densidade do solo ($g \text{ cm}^{-3}$); e e representa a espessura da camada do solo (cm).

Afim de comparar adequadamente os estoques entre os manejos, seria necessário fazer a comparação entre massas iguais de solo, ajustando os valores das camadas utilizadas nos cálculos, entretanto como não foram encontradas diferenças na Ds (Tabela 3), os estoques foram calculados sem necessidade da correção pela massa equivalente. Para verificar tendências de acúmulo ou perda de C das frações húmicas na seção de 0-0,40 m, foi calculada a variação do estoque de C (EC) de cada fração, em comparação à da floresta secundária (referência) ($\Delta EC, Mg \text{ ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

Tabela 3 - Densidade do solo ($g \text{ cm}^{-3}$) de um Plintossolo Argilúvico em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	Camadas (m)			
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40
FS	1,33±0,06 ^{ns}	1,41±0,03 ^{ns}	1,43±0,02 ^{ns}	1,48±0,01 ^{ns}
PP	1,42±0,03	1,43±0,02	1,43±0,04	1,45±0,03
P5	1,35±0,03	1,48±0,02	1,43±0,01	1,43±0,01
P8	1,37±0,03	1,43±0,02	1,43±0,02	1,44±0,03

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. ±: Erro padrão, ^{ns}: não significativo entre as áreas para cada camada pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Já as frações oxidáveis da MOS foram obtidas empregando diferentes graus de oxidação por meio de concentrações crescentes de ácido sulfúrico (3, 6 e 9 $mol \text{ L}^{-1}$), na qual são obtidas quatro frações com graus decrescentes de labilidade F1, F2, F3 e F4, obtidas pela diferença entre as concentrações e pelo próprio COT, conforme descrito por Chan et al. (2001) e adaptado

por Mendonça e Matos (2017). Pelas características de labilidade da fração F1 está é considerado como carbono lábil (CL) e o carbono não lábil (CNL) obtido por diferença: $CNL = COT - CL$ (ROSSET et al., 2016). Posteriormente visando à obtenção de índices para facilitar a compreensão da dinâmica entre as frações obtidas, foram realizadas as seguintes relações: F1/F4 e CL/COT.

5.3.4 Análise Estatística

Os dados oriundos dos diferentes manejos foram submetidos aos testes de normalidade e homogeneidade por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Quando atendidos esses pressupostos, as médias foram comparadas pelo teste t a 5% de probabilidade. Como análise complementar foi utilizado a análise multivariados de componentes principais, realizados com base na distância euclidiana. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R 4.0 (R CORE TEAM, 2021).

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram encontradas diferenças entre as áreas para os teores de COT e C das substâncias húmicas do solo (Tabela 4). As áreas FS e P8 apresentaram os maiores teores de COT em superfície, e com o aumento da profundidade do solo foram verificados nas áreas P8, 0,10-0,20 e 0,30-0,40 m, e PP, 0,10-0,20 a 0,30-0,40 m, as maiores contribuições sobre os teores de C do solo.

A semelhança dos teores entre as áreas de P8 e a FS em superfície e a predominância em profundidade da PP e P8 sobre os teores de COT podem estar associadas a absorção mais lenta em florestas secundárias, que possuem índice de sequestro de carbono apenas duas vezes maior que a floresta primária, além disso, a acúmulo de C nesse tipo de floresta é influenciado por períodos de déficit hídrico (ELIAS et al., 2020), muito comum no Estado do Maranhão que apresentam períodos de baixa precipitação e deficiência hídrica (MARANHÃO et al., 2013). Bastos et al. (2021) não verificaram diferenças entre os teores de COT em um Plintossolo amazônico, no Estado de Rondônia, entre as áreas de pastagem e floresta, o mesmo comportamento observado por Santos et al. (2018b) em Plintossolo no Estado do Maranhão.

A semelhança dos teores entre as áreas de P8 e a FS em superfície e a predominância em profundidade da PP e P8 sobre os teores de COT podem estar associadas a absorção mais lenta em florestas secundárias, que possuem índice de sequestro de carbono apenas duas vezes maior que a floresta primária, além disso, a acúmulo de C nesse tipo de floresta é influenciado por períodos de déficit hídrico (ELIAS et al., 2020), muito comum no Estado do Maranhão que

apresentam períodos de baixa precipitação e deficiência hídrica (MARANHÃO et al., 2013). Bastos et al. (2021) não verificaram diferenças entre os teores de COT em um Plintossolo amazônico, no Estado de Rondônia, entre as áreas de pastagem e floresta, o mesmo comportamento observado por Santos et al. (2018b) em Plintossolo no Estado do Maranhão.

Tabela 4 - Teores de carbono orgânico total e das frações húmicas da matéria orgânica do solo em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	COT	AF	AH	HUM	EA	AH/AF	EA/HUM
	-----g kg ⁻¹ -----						
0,00-0,10 m							
FS	9,65 a	1,04 a	1,21 a	7,32 b	2,25 a	1,15 b	0,31 a
PP	7,27 b	0,52 c	0,66 b	5,22 c	1,18 d	1,28 b	0,23 b
P5	7,66 b	0,55 c	0,98 a	5,37 c	1,53 c	1,88 a	0,29 a
P8	9,86 a	0,76 b	1,08 a	9,13 a	1,84 b	1,42 ab	0,20 b
0,10-0,20 m							
FS	4,31 c	0,44 b	0,36 b	4,02 b	0,79 b	0,81 ab	0,21 ab
PP	5,38 a	0,35 b	0,26 b	4,24 b	0,61 b	0,76 b	0,14 c
P5	4,68 b	0,52 b	0,54 a	4,06 b	1,06 a	1,13 a	0,26 a
P8	5,63 a	0,72 a	0,35 b	5,24 a	1,07 a	0,51 b	0,20 b
0,20-0,30 m							
FS	3,75 c	0,43 b	0,26 a	3,74 a	0,69 b	0,61 b	0,19 b
PP	4,84 a	0,26 d	0,18 b	3,85 a	0,43 d	0,67 ab	0,11 c
P5	4,05 c	0,34 c	0,27 a	3,87 a	0,61 c	0,81 a	0,16 b
P8	4,49 b	0,71 a	0,26 a	3,50 a	0,97 a	0,37 c	0,28 a
0,30-0,40 m							
FS	3,79 b	0,34 b	0,17 a	3,47 a	0,52 b	0,51 b	0,15 c
PP	5,15 a	0,26 c	0,17 a	3,07 ab	0,43 c	0,67 a	0,14 c
P5	4,06 b	0,34 b	0,17 a	3,24 c	0,51 b	0,51 b	0,19 b
P8	4,81 a	0,94 a	0,17 a	3,15 b	1,11 a	0,19 d	0,36 a

Nota. COT: Carbono orgânico total, AF: ácido fúlvico, AH: ácido húmico, HUM: humina, EA: extrato alcalino. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, para cada camada, não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

A pastagens cultivadas no bioma amazônico podem depositar em média 18,90 Mg ha⁻¹ de biomassa seca sobre a superfície (SANQUETTA et al., 2020), significando um aporte de mais de 7 Mg ha⁻¹ de C sobre a superfície do solo (MCTI, 2014; SANQUETTA et al., 2020). Já em profundidade as gramíneas tropicais podem produzir cerca de 10 Mg ha⁻¹ de biomassa de raízes secas, na qual cerca de 21 e 12% da biomassa das raízes e da parte aérea, respectivamente, são convertidos em COT (BAYER et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2017).

Sarto et al. (2020), observaram que após 8 anos do estabelecimento da pastagem foram encontradas na camada superficial teores de C semelhantes a floresta, podendo ser atribuído a diversos fatores como: maior deposição residual da parte aérea e radicular das plantas, resíduos dos animais que colaboram para aumento da atividade biológica, relação C/N do material que tende a ser maior em gramíneas entre outros fatores. Já em profundidade os melhores resultados das áreas P8 e PP podem ser atribuídos à capacidade da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em formar um sistema radicular volumoso, de crescimento rápido e bem desenvolvido que devido às constantes renovações proporcionadas pelo pastejo, as raízes mortas são decompostas pelos microrganismos do solo, liberando nutrientes e promovendo o aumento de compostos orgânicos (SALTON; TOMAZI, 2014; OLIVEIRA et al., 2018).

De maneira geral, independente da área, entre as SH foi observada predominância de C sobre a fração HUM, em todas as camadas, variando de 71,68 a 89,8 % do total (Tabela 4). Seguindo na superfície da predominância das frações de AH, 9,84 a 12,61%, e AF, 6,92 a 10,91%, e nas demais camadas comportamento inverso, na qual AF apresentou variação de 9,09 a 23,88% e AH de 4,08 a 10,56%.

Foi observado em superfície que a FS apresentou as maiores contribuições de C das frações AF e AH, seguida por P8 e P5, não diferindo destes no AH. Já para a HUM os maiores teores foram encontrados na P8, nas primeiras duas camadas, seguido pela FS, nas duas últimas camadas (Tabela 4). Nos AF os maiores teores de C foram encontrados na P8 que apresentou em média 39,36%, 39,44% e 63,41% nas camadas de 0,10-0,20 a 0,30-0,40 m, respectivamente, superior que FS. Os maiores teores de C dos AH foram observados sobre as áreas P5, camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, FS e P8, ambas 0,10-0,20 e 0,10-0,20 m, não havendo diferenças na última camada.

Para EA, as áreas FS, 0,00-0,10 m, P5, 0,10-0,20 m, e P8, 0,10-0,20 e 0,30-0,40 m, apresentaram os maiores teores (Tabela 4). Na relação entre os AH/AF foram observados ao longo das camadas avaliadas que P5 apresentou os maiores valores. Para relação EA/HUM os maiores valores foram encontrados nas áreas FS, 0,00-0,10 m, P5, 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, e P8, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m.

Ao verificar a variação do estoque de C das substâncias húmicas ao longo da seção de 0,00-0,40 m foram encontrados valores positivos na área P8 sobre Δ EC-AF (0,29) e Δ EC-HUM (0,82), um aumento sobre a variação de 199,86 e 187,76%, respectivamente, dessas frações quando comparado a PP, e negativo na Δ EC-AH em todas as pastagens, podendo salientar que P5 (-0,01) apresentou os melhores resultados (Figura 2).

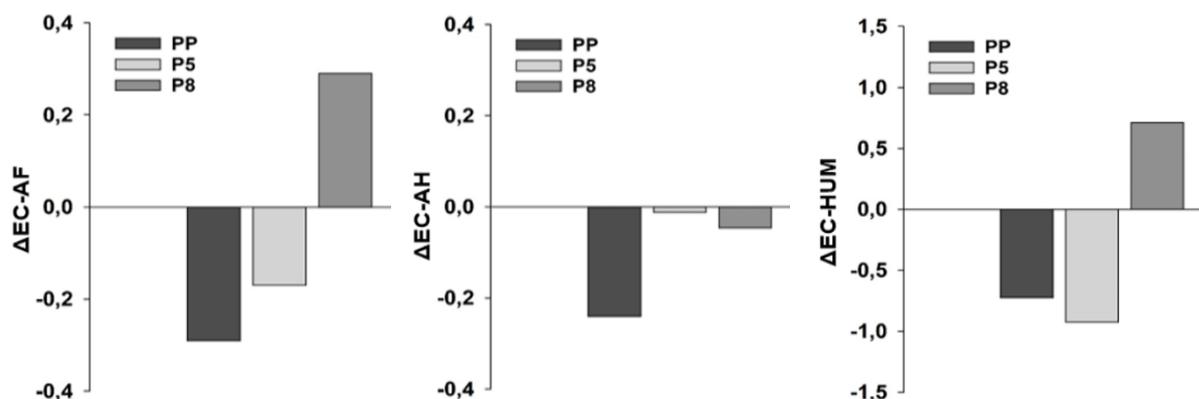


Figura 2 - Variação do estoque de carbono (ΔEC) das frações humificadas da matéria orgânica do solo nas diferentes áreas na Amazônia Maranhense, seção de 0,00-0,40 m. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

A recuperação da pastagem há 8 anos contribuiu de forma benéfica sobre o aumento dos teores da fração humina quando comparada a PP, evidente na $\Delta EC-HUM$ e componentes principais (Figuras 2 e 3), proporcionada possivelmente pela humina herdada da floresta, que foi preservada da atividade biológica pelo desenvolvimento inicial da pastagem que tendem a aportar grande biomassa de mais fácil acesso aos microorganismos (EBELING et al., 2013; SALTON; TOMAZI, 2014). Os maiores teores de C na fração HUM, em todas as áreas e camadas, e confirmada pelos baixos valores de relação EA/HUM, sendo comum em regiões tropicais a dominância da fração mais estável e insolúvel proporcionada pela intensa mineralização dos resíduos, como restrições edáficas à atividade biológica que reduzem o processo de humificação e é indicativo de forte estabilidade da MOS condicionado pelos baixos teores de argila (Tabela 1) (CUNHA et al., 2005; EBELING et al., 2011; ROSA et al., 2017).

Além disso, houve predominância da fração humina em todas as áreas e camadas, podem estar atreladas a sua insolubilidade aliada sua associação aos minerais e compostos de ferro (LI et al., 2015), este último muito presente em Plintossolos (SANTOS et al., 2018b). Outros fatores que podem auxiliar a entender sua predominância seria devido sua natureza química essencialmente alifática, derivadas de macromoleculares altamente resistentes à degradação biológica proveniente de plantas e, ou, microorganismos (VALLADARES et al., 2011), seu elevado peso molecular e maior grau de estabilidade, quando comparada às demais frações, conferindo proteção do C fixado, sendo considerada a fração mais significativa como reserva de carbono orgânico no solo (EBELING et al., 2013).

Em relação às frações alcalino-solúveis (AF e AH) a recuperação da pastagem (5 e 8 anos) proporcionou em grande parte os melhores resultados quando comparada pastagem perene, e que podem ser proporcionados pelas condições menores deposição de resíduos da PP, possivelmente proporcionada pela perda do vigor das plantas (PEREIRA et al., 2020) após 20 anos de implantação da pastagem perene, além das condições de preparo inicial do solo. Além disso, a recuperação da pastagem (5 e 8 anos) proporcionaram elevação dos teores de C dentro da fração AH, embora mesmo negativos na $\Delta EC-AH$ foram melhores que PP (Figura 2), assim como, seu maior peso sobre a componentes principais CP2 influenciando a destas (Figura 3), em superfície e em profundidade equiparáveis aos encontrados na floresta, podendo indicar maior estabilização da matéria orgânica, com maior conteúdo de carbono na forma humificada (EBELING et al., 2013).

Os altos teores de C sobre a fração AF para P8, assim como positivo na $\Delta EC-AF$ (Figura 2), podem ser atribuídos à maior deposição de resíduos pelas biomassa aérea e radicular, além dos resíduos dos animais, que contribuem sobre o acúmulo de material para decomposição e formação dessa fração, enquanto em profundidade os resultados encontrados podem ser atribuídos à maior mobilidade e menor condensação dos AF, em relação aos AH, permitindo que estejam presentes em maiores proporções nas partes inferiores dos horizontes devido sua mobilidade (CUNHA et al., 2005; VALADARES et al., 2011; EBELING et al., 2013; ROSA et al., 2017). Em relação a predominância dos AF em relação aos AH, principalmente em profundidade, foi observada em todas as áreas e confirmada quando observar-se os baixos valores de AH/AF, o que indicaria uma evolução limitada da matéria orgânica devido a razões edáfica, provavelmente devidos aos ciclos de umedecimento e secagem presente no solo e, ou, movimentação do lençol freático, assim como, aportes recentes de matéria orgânica (BENITES et al., 2013; ROSA et al., 2017).

Araújo et al. (2011), avaliando o impacto da conversão da floresta amazônica em pastagem, no Estado do Acre, verificaram comportamento similar ao observado no presente estudo para as substâncias húmicas, pastagens com maiores teores de COT, predominância da fração humina sobre as demais e maior formação dos AF quando comparados aos AH em profundidade, assim como sua mobilidade.

Os teores de C das frações oxidáveis e suas respectivas relações apresentaram diferenças entre as áreas nas camadas analisadas (Tabela 5). No geral, independente da área e camada, foi verificado o predomínio do C das frações mais recalcitrantes (F3 e F4), variando de 46,22 a 68,11%, em relação às mais lábeis (F1 e F2), entre 31,89 a 53,78%, confirmado também pelos altos teores de CNL e baixos valores das relações F1/F4 e CL/COT.

Tabela 5 - Teores de carbono das frações oxidáveis, carbono não-lábil (CNL), proporção de carbono lábil/COT (CL/COT) e relações entre as frações oxidáveis (F1/F4) em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	F1	F2	F3	F4	F1/F4	CNL	CL/COT
	-----g kg ⁻¹ -----					g kg ⁻¹	%
0,00-0,10 m							
FS	3,24 b	0,76 a	1,35 b	4,30 a	0,76 b	6,41 a	33,61 b
PP	2,01 d	0,31 b	1,16 ab	3,79 a	0,54 c	5,26 b	27,71 d
P5	2,31 c	0,75 a	0,94 c	3,66 a	0,63 bc	5,35 b	30,18 c
P8	3,63 a	0,59 a	1,78 a	3,86 a	0,96 a	6,23 a	36,89 a
0,10-0,20 m							
FS	1,27 b	0,76 a	0,97 a	1,31 c	0,99 b	3,04 b	29,55 bc
PP	1,41 b	0,47 a	0,51 b	3,00 a	0,48 c	3,97 a	26,16 c
P5	1,97 a	0,55 a	0,63 b	1,53 c	1,33 a	2,71 b	42,18 a
P8	2,01 a	0,51 a	0,57 b	2,54 b	0,80 b	3,62 a	35,80 b
0,20-0,30 m							
FS	1,02 c	0,67 ab	0,56 b	1,50 b	0,70 b	2,72 b	27,37 c
PP	1,38 b	0,81 a	0,71 ab	1,94 a	0,76 b	3,46 a	28,61 bc
P5	1,40 b	0,62 ab	0,48 b	1,55 ab	0,91 b	2,65 b	34,73 ab
P8	1,82 a	0,36 b	0,94 a	1,38 b	1,36 a	2,68 b	40,46 a
0,30-0,40 m							
FS	1,00 c	0,53 ab	0,42 bc	1,75 b	0,73 b	2,79 b	27,13 b
PP	1,43 b	0,31 b	0,30 c	3,10 a	0,46 b	3,71 b	27,88 b
P5	1,25 bc	0,58 ab	0,68 ab	1,55 b	0,85 ab	2,81 b	30,82 ab
P8	1,80 a	0,64 a	0,93 a	1,58 b	1,18 a	3,02 a	37,55 a

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, para cada camada, não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Ao analisar as frações oxidáveis de maneira isolada, foram verificados aumentos de 12,22 a 79,41% de teores de C da fração F1 sobre a área P8 quando comparada a floresta ao longo das camadas analisadas, assim como sobre a fração F3, não diferindo de P5 e PP em algumas camadas (Tabela 5). Na fração F2 foram observados nas áreas FS e P5, ambas em 0,00-0,10 m, P8, 0,00-0,10 e 0,30-0,40 m, e PP, 0,20-0,30 m, os maiores teores de C, não sendo observada diferença das áreas na camada de 0,10-0,20 m. Já para a Fração F4 não foram observadas diferenças das áreas na camada de 0,00-0,10 m, e nas demais a área de PP apresentou os maiores teores de C, não diferindo de P5 na camada de 0,20-0,30 m.

Sobre a relação F1/F4 e CL/COT foram encontrados nas áreas P8, camadas 0,00-0,10, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, e P5, 0,10-0,20 m, os maiores valores quando comparado aos demais, e variando em média 78,81 a 176,96% e 33,14 a 61,24%, respectivamente, nestas relações,

sendo superiores quando comparado a PP (Tabela 5). Observou-se maiores teores de CNL nas áreas de FS, 0,00-0,10 m, P8, 0,00-0,10, 0,10-0,20 m e 0,30-0,40 m, e PP, 0,10-0,20 a 0,20-0,30 m.

Pelo fracionamento de carbono orgânico oxidável a predominância de C sobre a forma recalcitrantes (F3 e F4) e CNL, confirmam o comportamento observado sobre o predomínio sobre de C na fração humina, assim como, pelas baixas valores das relações F1/F4 e CL/COT, indicando que mesmo os baixos teores de C encontrados no solo em grande parte estão associadas a compostos de maior estabilidade, maior interação com a fração mineral do solo dificultando o ataque microbiano, maior peso molecular e tempo permanência no solo (ROSSET et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2018; XU et al., 2021).

A recuperação da pastagem há 8 anos proporcionou aumentos sobre os teores de C encontrados dentro das frações lábeis (F1), moderadamente recalcitrante (F3) e não lábil (CNL) quando comparadas a pastagem perene, graças aos aportes iniciais e maior vigor das plantas refletindo em maiores aporte de biomassa sobre a superfície pela parte aérea e dentro do solo pela parte radicular (PEREIRA et al., 2020; XU et al., 2021), além disso, esse aumento reflete na capacidade de recuperação dos teores de C do solo em alguns casos maiores que os encontrado dentro da Floresta. As melhorias do acúmulo de C da área P8 dentro das frações F1, F3 e CNL, assim como dentro da relação F1/F4, demonstram a importância da recuperação da pastagem em melhorar a capacidade de fixação do CO₂ diminuindo sua emissão para atmosfera e preservando no solo. Esses resultados sobre as frações lábeis proporcionados pela recuperação podem demonstrar os benefícios das alterações promovidas ao solo, devido à maior sensibilidade quando comparada às demais em verificar as alterações ocasionadas pela mudança de manejo (LUO et al., 2021; XU et al., 2020), assim como, dentro das frações moderadamente recalcitrante e não lábil contribuem para a estabilização do carbono orgânico do solo (SONG et al., 2021; XU et al., 2021).

Xu et al. (2020), também verificaram aumentos nos teores de C dentro da fração lábil (F1) do solo com o passar dos anos após recuperação de áreas desmatadas proporcionada pelo maior aporte inicial de biomassa e com benefícios sobre a estrutura do solo, conteúdo de nutrientes, aumentando o reservatório de C, atividade biológica entre outros. Além disso, após as transformações químicas que ocorrem no solo e a proteção física do C proporcionam aumentos sobre o acúmulo dentro das frações recalcitrantes são parâmetros que reforçam a estabilidade e a capacidade do solo em melhorar suas condições (SONG et al., 2021).

Pela análise de componentes principais (CP) verificou-se que os dois primeiros componentes (CP1 e CP2) explicaram acima de 90% da variação total dos dados, sendo

observado variações de 52,3 e 42,7% para as CP1 e CP2, respectivamente (Figura 3). Pela coloração dos vetores é possível verificar que todas as variáveis apresentaram as altas contribuições sobre as componentes principais 1 e 2, reduzindo assim o número de eixos necessários para explicar a variação dos dados, assim como, verificou-se as maiores correlações ($>0,70$) a partir do tamanho do vetor de COT, F1, F3, AF e HUM para a CP1 e F2, F4, CNL, AH para a CP2 (Figura 3).

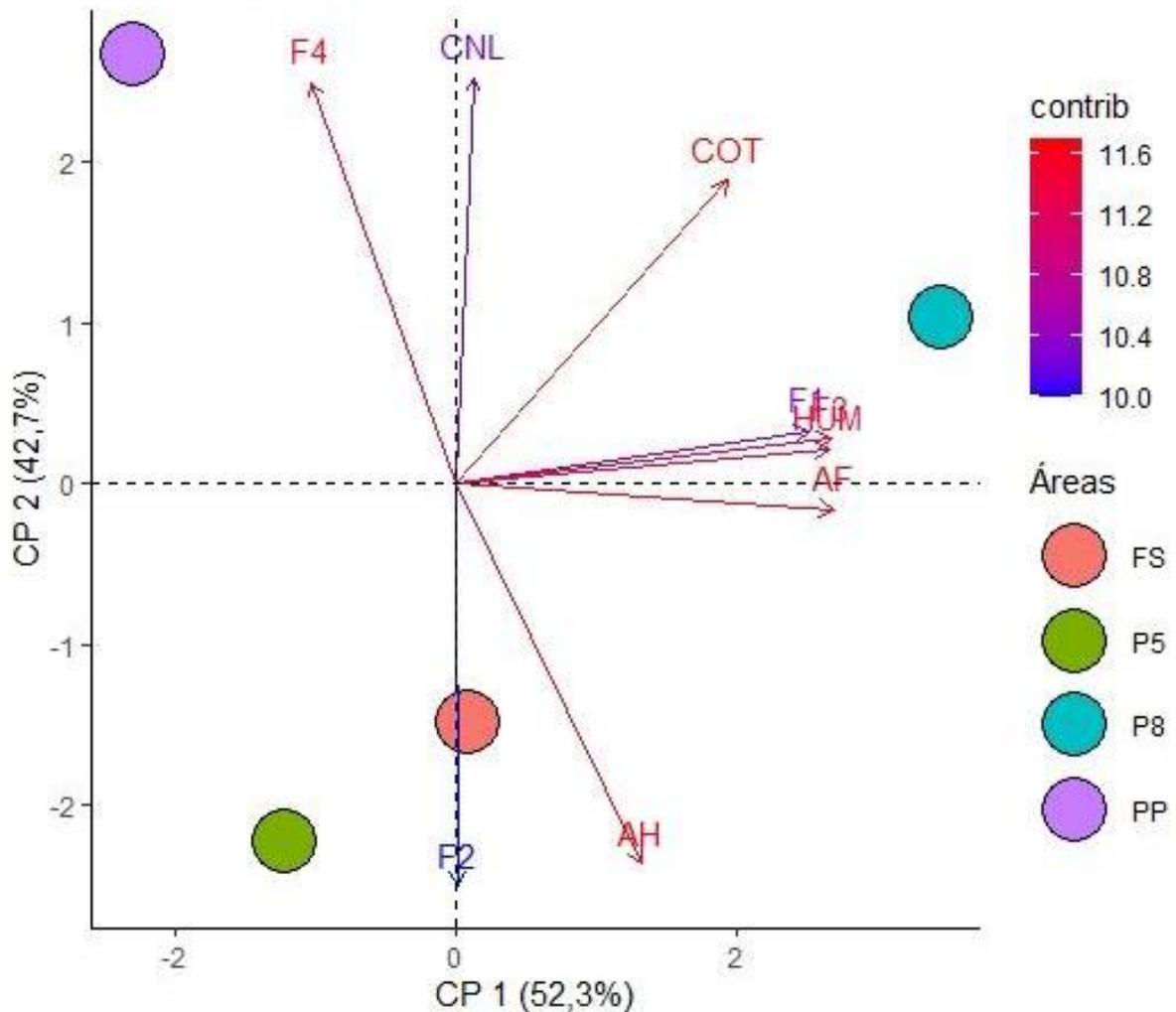


Figura 3 - Análise de componentes principais nas diferentes áreas na Amazônia Maranhense, seção de 0,00-0,40 m. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

É observado a separação das áreas em quadrantes distintos e pela distribuição das áreas é possível evidenciar a seguinte ordem crescente $P8 > FS > P5 > PP$ de impacto sobre a qualidade do solo (Figura 3). Ao analisar as componentes pode-se observar que a CP1 influenciou as áreas P8 e FS de forma positiva e PP e P5 negativa, enquanto na CP2 verificou-

se influência positivas sobre as áreas PP e P8 e negativa sobre P5 e FS, e de modo geral, as áreas próximas da ponta dos vetores apresentaram as maiores contribuições destes, corroborando com os resultados observado nas análises individuais, verificando-se sobre a área de FS os maiores teores nos ácidos húmicos (AH) e fração moderadamente lábil (F2), a PP nas frações recalcitrantes (F4), a P5 na fração moderadamente lábil (F2) e a P8 sobre COT, frações oxidáveis de maior labilidade e moderadamente recalcitrante (F1, F3) e as substâncias húmicas (AF e HUM).

5.5 CONCLUSÕES

O processo de recuperação de pastagem promoveu melhorias nas diferentes frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo, apresentando-se como alternativa de manejo do solo benéfico para a região da Amazônia Maranhense.

Pela análise de componentes principais as áreas estudadas foram classificadas na seguinte ordem decrescente de qualidade: pastagem perene recuperada há oito anos, floresta secundária, pastagem perene recuperada há cinco anos e pastagem perene, em função dos impactos positivos sobre as diferentes frações da matéria orgânica do solo.

5.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. J.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711-728, 2014.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impact of forest-pasture conversion on stocks and dynamics of soil carbon and humic substances in the Amazon. *Acta Amazonica*, v.41, n.1, p.103-114, 2011.

BASTOS, A. S.; SANQUETTA, C. R.; MANIESI, V.; SANQUETTA, M. N. I.; CORTE, A. P. D. Amazon plinthosols: carbon stocks and physical properties under different land uses. *Ciência Florestal*, v.31, n.2, p.749-765, 2021.

BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C. E. C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; NICOLOSO, R. D. S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: Klauberg Filho, O.; Mafra, A. L.; Gatiboni, L. C. (eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 55-117

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 Solos, 2003. 7p. (Comunicado Técnico, 16)

CHAN, K. Y.; BOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an paleustalf under different pasture leys. **Soil Science**, v.166, n.1, p.61-67, 2001.

CUNHA, T. F.; CANELLAS, L. P.; SANTAS, G. A.; RIBEIRO, L. P. Fracionamento da matéria orgânica humificada de solos brasileiros. In: CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A. (Ed.). **Humosfera: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas**. Rio de Janeiro: UENF, 2005. p. 54-80.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; PINHEIRO, É. F. M.; VALLADARES, G. S. Humic substances and relationship to soil attributes. **Bragantia**, v.70, n.1, p.157-165, 2011.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S.; PÉREZ, D. V. Humic substances and their relationship to the degree of subsidence of histosols in different formation environments in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.2, p. 225-233, 2013.

ELIAS, F.; FERREIRA, J.; LENNOX, G. D.; BERENQUER, E.; FERREIRA, S.; SCHWARTZ, G.; MELO, L. O.; REIS JÚNIOR, D. N.; NASCIMENTO, R. O.; FERREIRA, F. N.; ESPIRITO-SANTO, F.; SMITH, C. C.; BARLLOW, J. Assessing the growth and climate sensitivity of secondary forests in highly deforested Amazonian landscapes. **Ecology**, v.101, n.3, p.e02654, 2020.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Oxidizable carbon fractions in Red Latosol under different management systems. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.2, p.242-250, 2013.

LI, C.; GAO, S.; GAO, Q.; WANG, L.; ZHANG, J. Characterization of bulk soil humin and its alkaline-soluble and alkaline-insoluble fractions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.1, p.120-126, 2015.

LUO, Y.; LI, Y.; LENG, Z.; RAO, J.; HUANG, D.; YU, P. Dynamics of soil organic carbon fractions in soil aggregates of mollisols under different land-uses in northeast China. **Fresenius Environmental Bulletin**, v.30, n.4, p.4544-4552, 2021.

MACHADO, D. L.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, L. L.; DINIZ, A. R.; GUARESCHI, R. F. Organic matter and soil fertility in different successional stages of seasonal semideciduous forest. **Revista Caatinga**, v.32, n.1, p.179-188, 2019.

MARANHÃO. **Atlas do Maranhão**. Secretaria de Estado do Planejamento e Orçamento, Núcleo Geoambiental UEMA. São Luís: SEPLAN, 2013. 90p.

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **III Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. Relatórios de Referência, Emissões no setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas, 2014.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. (Ed.). **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. 2. ed. rev. atual. Viçosa, MG: UFV, Gefert, 2017. 221p.

MORAIS, D. H. O.; SILVA, C. A.; ROSSET, J. S.; FARIAS, P. G. S.; SOUZA, C. B. S.; OZORIO, J. M. B.; CASTILHO, S. C. P.; MARRA, L. M. Stock and indices of carbon management under different soil use systems. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 56, n.2, p. 286-295, 2021.

REGO, C. A. R. M.; OLIVEIRA, P. S. R.; PIANO, J. T.; ROSSET, J. S.; EGEWARTH, J. F.; MATTEI, E.; SAMPAIO, M. C.; HERRERA, J. L. Organic Matter Fractions and Carbon Management Index in Oxisol Under Integrated Agricultural Production Systems. **Journal of Agricultural Studies**, v.8, n.3, p.237-256, 2020.

OLIVEIRA, J. M.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; ASSIS, P. C. R.; SILVEIRA, A. L. R.; LIMA, M. L. L.; WRUCK, F. J.; MEDEIROS, J. C.; MACHADO, P. L. O. A. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**, v.18, n.4, p.105-116, 2017.

OLIVEIRA, T. P.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; NANZER, M. C.; BARRETA, P. G. V.; SILVA, M. F. G.; QUEIROZ, G. R. S. S.; PRADO, E. A. F. Carbono lábil e frações oxidáveis de carbono em solos cultivados sob diferentes formas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.8, n.3, p. 49-56, 2018.

PEREIRA, M. A., COSTA, F. P., MONTAGNER, D. B., EUCLIDES, V. P. B., ARAÚJO, A. R., BARBOSA, R. A., SOUZA, J. A. B. A. **Pastagens**: condicionantes econômicos e seus efeitos nas decisões de formação e manejo. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2020. 24p. (Comunicado técnico, 150).

PIANO, J. T.; MORAES REGO, C.A.R.; VENGEN, A. P.; EGEWARTH, J. F.; EGEWARTH, V. A.; MATTEI, E.; OLIVEIRA, P. S. R.; HERRERA, J. L. Soil organic matter fractions and carbon management index under integrated crop-livestock system. **Bioscience Journal**, v. 36, n.3, p.743-760, 2020.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Austria: Vienna, 2021.

RIOS, L. **Estudos de Geografia do Maranhão**. São Luís: Gráphis Editora, 2001. 50 p.

ROSA, D. M.; NÓBREGA, L. H. P.; MAULI, M. M.; LIA, G. P.; PACHECO, F. P. Humic substances in soil cultivated with cover crops rotated with maize and soybean. **Revista Ciência Agronômica**, v.48, n.2, p.221-230, 2017.

ROSA, D. M.; NÓBREGA, L. H. P.; MAULI, M. M.; LIMA, G. P.; PACHECO, F. P. Humic substances in soil cultivated with cover crops rotated with maize and soybean. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 2, p. 221-230, 2017.

ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Chemical and oxidizable fractions of soil organic matter under different management systems in an Oxisol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1529-1538, 2016.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. 6 p. (Comunicado técnico 198).

SANQUETTA, C. R.; ALEXIS, S. B.; SANQUETTA, M. N. I.; ROSARIO, P. H. C. K.; CORTE, A. P. D.; PIVA, L. R. O. BIOMASS AND CARBON STOCKS OF CULTIVATED PASTURE IN NORTHERN RONDONIA. **BIOFIX Scientific Journal**, v.5 n.1 p. 102-107 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018a. 356p.

SANTOS, C. C.; FERRAZ JUNIOR, A. S. L.; SÁ, S. O.; MUÑOZ GUTIÉRREZ, J. A.; BRAUN, H.; SARRAZIN, M.; BROSSARD, M.; DESJARDINS, T. Soil carbon stock and Plinthosol fertility in smallholder land-use systems in the eastern Amazon, Brazil, **Carbon Management**, v.9, n.6, p.655-664, 2018b.

SARTO, M. V. M., BORGES, W. L. B., BASSEGIO, D., PIRES, C. A. B., RICE, C. W., ROSOLEM, C. A. Soil microbial community, enzyme activity, C and N stocks and soil aggregation as affected by land use and soil depth in a tropical climate region of Brazil. **Archives of Microbiology**, v.202, n.6, p.2809-2824, 2020.

SONG, Y.; ZHAI, J.; ZHANG, J.; QIAO, L.; WANG, G.; MA, L.; XUE, S. Forest management practices of *Pinus tabulaeformis* plantations alter soil organic carbon stability by adjusting microbial characteristics on the Loess Plateau of China. **Science of The Total Environment**, v.766, n.4, p.144209, 2021.

SWIFT, R.S. **Organic matter characterization**. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T. & SUMNER, M.E., eds. Methods of soil analysis. Chemical methods. Part 3. Madison, Soil Science Society of America; American Society of Agronomy, 1996. p.1011-1020. (Soil Science Society of America Book Series, 5)

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573p.

VALLADARES, G. S.; BATISTELLA, M. PEREIRA, M. G. Changes promoted by management in Oxisol, Rondônia, Brazilian Amazon. **Bragantia**, v.70, n.3, p.631-637, 2011.

XU, H.; QU, Q.; CHEN, Y.; LIU, G.; XUE, S. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China. **Catena**, v.196, n.1, p.104812, 2021.

XU, H.; QU, Q.; LU, B.; Zhang, Y.; LIU, G.; XUE, S. Variation in soil organic carbon stability and driving factors after vegetation restoration in different vegetation zones on the Loess Plateau, China. **Soil and Tillage Research**, v.204, n.10, p.104727, 2020.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.

6 CAPÍTULO IV - QUAIS OS IMPACTOS CAUSADOS PELA REMOÇÃO DA VEGETAÇÃO NATURAL NOS TEORES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM PLINTOSSOLO NA AMAZÔNIA MARANHENSE?

6.1 RESUMO

Entender os impactos da recuperação das pastagens sobre os processos de formação da matéria orgânica no solo são extremamente importantes, neste sentido, as avaliações quantitativas são ferramentas capazes de medir a alteração dos diferentes manejos sobre os processos de formação e manutenção desta. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivos avaliar os teores, estoques e abundância isotópica do carbono (C) e nitrogênio (N) em pastagens com diferentes anos de recuperação, quando comparadas à floresta secundária. Foram avaliados os seguintes manejos: Floresta secundária (FS), Pastagem perene (PP), Pastagem recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) e Pastagem recuperada e formada há oito anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). Foram determinados os teores e estoques de carbono total (CT), nitrogênio total (NT), abundância dos isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em diferentes camadas. Ao longo do perfil a área P8 apresentou os maiores teores de C e N totais. Em relação aos estoques de C e N foi observado que as áreas P8 e PP apresentaram os maiores valores quando comparados à floresta. Pela abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ foi possível observar na área PP o maior enriquecimento, P5 e P8 comportamento intermediário e na FS o menor enriquecimento, enquanto para $\delta^{15}\text{N}$ não houveram diferenças. A recuperação da pastagem há oito anos apresentou proporcionaram aumentos sobre os teores de C e N quando comparado a pastagem perene e a floresta contribuindo para a capacidade de melhoria de estocagem no solo.

PALAVRAS-CHAVE: Amazônia legal, Isótopos estáveis, Matéria orgânica do solo

WHAT ARE THE IMPACTS CAUSED BY THE REMOVAL OF NATURAL VEGETATION ON CARBON AND NITROGEN CONTENT IN PLINTOSOL IN THE MARANHENSE AMAZON?

ABSTRACT

Understanding the impacts of pasture recovery on the processes of formation of organic matter in the soil is extremely important, in this sense, quantitative assessments are tools capable of measuring the change of different managements on the processes of formation and maintenance of this. Therefore, the present work aims to evaluate the levels, stocks and isotopic abundance of carbon (C) and nitrogen (N) in grassland with different recovery years, when compared to secondary forest. The following managements were assessed: Secondary Forest (SF), Grassland (PP), Grassland recovered and formed five years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P5) and Grassland recovered and formed eight years ago by the intercropping of corn + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (P8). The contents and stocks of total carbon (TC), total nitrogen (NT), abundance of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isotopes in different layers were determined. Along the profile, the P8 area showed the highest levels of total C and N. In relation to C and N stocks, it was observed that the P8 and PP areas presented the highest values when compared to the forest. Due to the natural abundance of $\delta^{13}\text{C}$, it was possible to observe the highest enrichment in the PP area, P5 and P8 intermediate behavior and in the FS the lowest enrichment, while for $\delta^{15}\text{N}$ there were no differences. Grassland recovery eight years ago showed increases in C and N contents when compared to perennial grassland and forest, contributing to the capacity to improve soil storage.

KEYWORDS: Legal Amazon, Stable isotopes, Soil organic matter

6.2 INTRODUÇÃO

Entre as áreas de floresta no Estado do Maranhão 72,46% encontram-se desmatadas (INPE, 2020), destas 26,70% foram convertidas em pastagens (IBGE, 2021), muitas implantadas a partir de práticas inadequadas empregando a derrubada da vegetação, queima dos restos culturais e exploração da baixa fertilidade natural (SANTOS et al., 2018a; SILVA JÚNIOR et al., 2020). Além disso, os altos índices de precipitação e temperatura aliado ao material de origem sedimentar dos solos no estado, tem efeitos direto sobre o empobrecimento da fertilidade natural e conteúdo da matéria orgânica do solo (MOS), que podem ser intensificados pela predominância de solos frágeis e propensos à erosão gerando perdas sobre a capacidade produtiva (MARANHÃO et al, 2003; CELENTANO et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2022).

As pastagens armazenam 30% do carbono (C) terrestre e são um grande reservatório deste elemento (ASSIS et al., 2017; MOSIER et al., 2021; ZEFERINO et al., 2021). Entretanto, é necessário através de práticas sustentáveis de manejos e recuperação por meios conservacionistas, a fim de melhorar a qualidade do solo, mitigando o aumento do dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, bem como manter a produtividade das culturas (MOSIER et al., 2021). Além disso, entender os impactos da recuperação das pastagens sobre os processos de formação da matéria orgânica do solo (MOS) é extremamente importante.

O conteúdo de C e nitrogênio (N) no solo são dependentes da MOS e a mudança no uso e manejo do solo podem proporcionar perturbações, que alteram os estoques e equilíbrio destes elementos (HEYN et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2022). Assim como, modificações dentro da capacidade produtiva dos cultivos, aumentos na concentração atmosférica dos gases do efeito estufa (GEE) (CELENTANO et al., 2020), perda da qualidade estrutural (FERREIRA et al., 2020) e diversidade biológica dos solos (FERREIRA et al., 2019; HEYN et al., 2019).

Neste sentido, as avaliações quantitativas da MOS são ferramentas capazes de medir a alteração dos diferentes manejos sobre os processos de formação desta (ALVES et al., 2005). Além da determinação dos teores e estoques totais de C e N, o emprego da abundância de isótopos estáveis proporciona entendimento dos impactos dos manejos, sendo possível obter informações da composição da MOS, enquanto sua origem antes e após a mudança do uso do solo.

Os isótopos estáveis (¹³C e ¹⁵N) apresentam-se naturalmente na atmosfera e em menor quantidade e maior peso que seus homólogos (¹²C e ¹⁴N), possibilitando em função dos diferentes ciclos fotossintéticos das plantas (C3, C4 e CAM), aos ciclos e reações químicas terem seus teores enriquecidos no solo, servindo como parâmetros para entender as

modificações ocorridas seja pelo manejo, influência do emprego de insumos externos e espécies promissoras a serem usadas a fim de aumentar a quantidade e qualidade da MOS (ALVES et al., 2005; BIELUCZYK et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2022).

Diante do exposto, este trabalho parte da hipótese que a recuperação de áreas de pastagem via integração lavoura-pecuária, pode proporcionar alterações benéficas sobre os teores, estoques e abundância isotópicas do C e N contribuindo para melhoria do solo. Portanto, esse trabalho tem como objetivo avaliar os teores, estoques e abundância isotópica do carbono (C) e nitrogênio (N) em pastagens com diferentes anos de recuperação, quando comparadas à floresta secundária.

6.3 MATERIAL E MÉTODOS

6.3.1 Local de estudo

O local de estudo e suas características estão presentes no item 3.3.1 do capítulo I (pág. 17).

6.3.2 Sistemas Avaliados e Históricos de Uso

Os sistemas avaliados e seus respectivos históricos de uso estão apresentados no item 3.3.2 do capítulo I (pág. 18).

6.3.3 Coleta das Amostras de Solo e Avaliações

Em cada sistema de uso do solo foram abertas cinco trincheiras com dimensões de 1 x 1 x 1 m, dispostas aleatoriamente nas áreas. As amostras foram coletadas no período do verão, época na qual ocorrem os maiores volumes de precipitação colaborando com o teor de umidade próximo a capacidade de campo. Em paredes opostas da trincheira foram coletadas amostras indeformadas utilizando-se coletor Uhland com anéis volumétricos com volume conhecido de aço inox com 100 cm³, compreendendo as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m para determinação da densidade do solo (Ds) (TEIXEIRA et al., 2017).

Foram realizadas coletas de amostras deformadas em 3 pontos equidistantes de 10 metros em relação a cada parede da trincheira, com auxílio de trado tipo holandês, totalizando 12 amostras simples para compor uma amostra representativa nas mesmas camadas anteriormente citadas. As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2 mm de malha, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

As amostras de solo foram finamente moídas em almofariz para a análise de carbono e nitrogênio total (CT e NT) em analisador elementar (Flash EA 1112, Thermo Electron Corporation, Milan, Italy) e abundância isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) e ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) em espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS) (DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany) acoplado a um analisador elementar (Flash 2000 IRMS, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany) do Laboratório de Análise Elementar e Isótopos Estáveis do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria.

Os resultados foram expressos na forma de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (‰), sendo o C em relação ao padrão internacional Pee-Dee Belemnite (PDB) e o N em relação à composição atmosférica. A partir dos valores obtidos de $\delta^{13}\text{C}$ em cada sistema de manejo foi quantificado a contribuição isotópica provenientes dos diferentes ciclos fotossintético, uma vez que existe discriminação da fixação deste tipo de C em relação as plantas C3 (Floresta) e C4 (gramíneas). Os cálculos foram realizados de acordo com Balesdent et al. (1987) usando as seguintes equações:

$$\text{C4(‰)} = ((\delta^{13}\text{CP} - \delta^{13}\text{CFS}) / (\delta^{13}\text{Cgram} - \delta^{13}\text{CFS})) \times 100$$

$$\text{C3(‰)} = 100 - \text{C4(‰)}$$

Onde: C4 (‰) é o carbono provenientes de plantas com ciclo fotossintético C4; C3 (‰) é o carbono proveniente de plantas com ciclo fotossintético C3; $\delta^{13}\text{CP}$ representa o teor de carbono isotópico das amostras de solo nos diferentes ambientes de pastagens; $\delta^{13}\text{CFS}$ representa o teor de carbono isotópico das amostras de solo da floresta secundária; $\delta^{13}\text{Cgram}$ é o teor de carbono isotópico provenientes dos resíduos vegetais na área de pastagem, sendo empregado na superficial o valor de -11,26‰ e nas subseqüentes -12,20‰.

Para o cálculo do estoque de CT e NT foram realizados através da seguinte equação:

$$\text{Est} = (\text{C ou N} \times \text{Ds} \times e) / 10$$

Onde: Est representa o estoque de carbono ou nitrogênio em determinada camada expresso em Mg ha^{-1} ; C ou N representa o teor na camada (g kg^{-1}); Ds representa a densidade do solo (g cm^{-3}); e e representa a espessura da camada do solo (cm).

A fim de comparar adequadamente os estoques entre os manejos, seria necessário fazer a comparação entre massas iguais de solo, ajustando os valores das camadas utilizadas nos cálculos, entretanto como não foram encontradas diferenças na Ds (Tabela 3). Diante disso, os estoques foram calculados sem necessidade da correção pela massa equivalente. De posse dos valores individuais para cada camada foi realizada a soma destes para o acumulado do estoque de CT e NT dentro da seção 0,00-1,00 m.

Tabela 3 - Densidade do solo (g cm^{-3}) de um Plintossolo Argilúvico em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Camadas (m)	Áreas			
	FS	PP	P5	P8
0,00-0,10	1,33±0,06 ^{ns}	1,42±0,03	1,35±0,03	1,37±0,03
0,10-0,20	1,41±0,03 ^{ns}	1,43±0,02	1,48±0,02	1,43±0,02
0,20-0,30	1,43±0,02 ^{ns}	1,43±0,04	1,43±0,01	1,43±0,02
0,30-0,40	1,48±0,01 ^{ns}	1,45±0,03	1,43±0,00	1,44±0,03
0,40-0,60	1,48±0,02 ^{ns}	1,49±0,04	1,48±0,04	1,44±0,06
0,60-0,80	1,48±0,01 ^{ns}	1,50±0,04	1,50±0,02	1,43±0,02
0,80-1,00	1,48±0,03 ^{ns}	1,51±0,02	1,51±0,03	1,46±0,03

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada há cinco anos e P8: Pastagem perene recuperada há oito anos. \pm : Erro padrão, ^{ns}: não significativo entre as áreas na linha, para cada camada, pelo teste t ($p \leq 0,05$).

6.3.4 Análise estatística

Os procedimentos estatísticos empregados são apresentados no item 3.3.4 do capítulo I (pág. 21).

6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram encontradas diferenças ao longo do perfil entre as áreas estudadas, e em geral a área P8 apresentou os maiores teores de C e N totais, embora não tenha diferido em algumas camadas das demais (Tabela 4). Já os menores teores foram observados sobre a área P5, embora em alguns casos não diferiram dos demais, possivelmente devido ao preparo realizado sobre a área e o tempo de recuperação dos teores de C e N totais curto. Troian et al. (2020) e Martins et al. (2020) ao analisarem diferentes manejos também observaram que o preparo e o tempo de recuperação do solo podem afetar os teores de C do solo.

Esses resultados após a recuperação há 8 anos, podem estar relacionados a capacidade das forrageiras em depositar altos volumes de biomassa vegetal, aérea e radicular, sobre o solo, proporcionando pelo restabelecimento das plantas e ao manejo adotado que tendem a colaborar para os aumentos significativos sobre os teores de C e N observados. Zeferino et al. (2021), verificaram em diferentes cenários simulados alta produção de biomassa forrageira quando condicionada a adoção de práticas sustentáveis de manejo, resultando em aumento da capacidade de armazenagem de C e N ao solo em zonas de transição Cerrado/Amazônia.

Tabela 4 - Teores de carbono (CT) e nitrogênio total (NT) ao longo do perfil do solo em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Camadas (m)	Áreas							
	FS	PP	P5	P8	FS	PP	P5	P8
	CT (g kg ⁻¹)				NT (g kg ⁻¹)			
0,00-0,10	9,85 a	8,56 ab	7,41 b	9,86 a	0,82 b	1,26 a	0,62 b	1,22 a
0,10-0,20	4,51 a	5,19 a	4,39 a	5,37 a	0,51 b	0,72 a	0,40 b	0,66 a
0,20-0,30	3,86 ab	4,02 ab	3,21 b	4,87 a	0,51 bc	0,62 ab	0,39 c	0,71 a
0,30-0,40	3,73 bc	4,77 ab	3,02 c	4,93 a	0,53 b	0,65 ab	0,38 c	0,69 a
0,40-0,60	3,80 a	3,50 ab	2,66 b	3,73 a	0,57 a	0,55 a	0,36 b	0,56 a
0,60-0,80	3,05 a	2,81 a	2,29 a	2,45 a	0,44 a	0,44 a	0,31 a	0,37 a
0,80-1,00	2,21 a	2,38 a	2,39 a	2,17 a	0,27 a	0,37 a	0,36 a	0,36 a

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de letras minúsculas na linha, entre camadas, não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Esses resultados após a recuperação há 8 anos, podem estar relacionados a capacidade das forrageiras em depositar altos volumes de biomassa vegetal, aérea e radicular, sobre o solo, proporcionando pelo restabelecimento das plantas e ao manejo adotado que tendem a colaborar para os aumentos significativos sobre os teores de C e N observados. Zeferino et al. (2021), verificaram em diferentes cenários simulados alta produção de biomassa forrageira quando condicionada a adoção de práticas sustentáveis de manejo, resultando em aumento da capacidade de armazenagem de C e N ao solo em zonas de transição Cerrado/Amazônia.

Guardiola et al. (2017), ao avaliarem diferentes formas de uso do solo na região amazônica, encontraram os maiores teores de C também em áreas de pastagem, proporcionada graças ao manejo rotacionado que era submetida é que influenciou num aumento de 67,74% quando comparada a floresta. Fujisaki et al. (2015), observaram em pastagens com idade média de 17,6 anos incrementos de 6,8% de C quando comparada a florestas no bioma Amazônia (Brasil, Colômbia, Guiana Francesa, Suriname). Neill et al. (1999), observaram que florestas após sua conversão em pastagem na região amazônica, Estado de Roraima, apresentam a ciclagem de N mantida por um longo período, podendo eventualmente diminuir em pastagens antigas, e isso pode ser acentuada pelo manejo adotado. Demonstrando, portanto, a importância do manejo da pastagem é fundamental para aumentar sua eficiência na captura e armazenamento de carbono e nitrogênio ao solo.

Embora não se tenha observado diferenças entre as áreas após a camada de 0,40-0,60 m, é interessante salientar que a redução em média de 0,5 g kg⁻¹ e 0,1 g kg⁻¹ sobre os teores de

C e N, respectivamente, em todas as áreas é relacionada ao aparecimento de pequenas faixas contínuas e consolidadas de Petroplintita, insuficientes para caracterizar um horizonte diagnóstico, com seu aparecimento ocorrendo de 50 a 70 cm (SANTOS et al., 2018b). Essa formação é proporcionada pela mistura de minerais de argilas, ricas em ferro ou ferro e alumínio, e pobre em C, e sua dureza é afetada pelos ciclos de umedecimento e secagem do solo proporcionando impedimento para o crescimento das raízes em determinados momentos (SANTOS et al., 2018b).

Em relação aos estoques de C e N foi observado que as áreas P8 e PP apresentaram 4,18 e 2,03 Mg ha⁻¹ e 1,25 e 1,64 Mg ha⁻¹, respectivamente, maiores valores quando comparados à floresta. Isso significou uma taxa de acúmulo anual de 0,523 e 0,041 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ sobre o conteúdo de C e 0,156 e 0,033 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no N para esses manejos, respectivamente (Tabela 5). Os menores estoques de C e N observados na área P5 (Tabela 5), assim como nos teores totais (Tabela 4), podem estar relacionados ao processo de gradagem realizado, causando a exposição da matéria orgânica aos microorganismos, culminando para perdas de C e N para a atmosfera. Ydoyaga et al. (2006), ao avaliarem diferentes alternativas de recuperação de pastagem observaram que o emprego da gradagem proporcionou diminuição sobre a produção de biomassa seca das plantas, comprometendo a recuperação e demora da ressemeadura natural da forrageira, assim como, favorecer a ação da erosão e perda de nutrientes do solo, apresentando efeitos mais acentuados em solos de textura arenosa.

Tabela 5 - Estoques de carbono (CT) e nitrogênio total (NT), taxas de acúmulo e perdas na camada de 1 m de profundidade no solo em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Áreas	EstCT (Mg ha ⁻¹)	Variação		
		EstCT (Mg ha ⁻¹)	Tempo (ano)	Taxa de acúmulo ou perda (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
FS	38,85 ±1,73 ab	-	-	-
PP	40,88 ±2,46 a	2,03	49	0,041
P5	30,71 ±4,06 b	-8,14	5	-1,628
P8	43,03 ±2,11 a	4,18	8	0,523

Áreas	EstNT (Mg ha ⁻¹)	Variação		
		EstNT (Mg ha ⁻¹)	Tempo (ano)	Taxa de acúmulo ou perda (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
FS	7,10 ±0,15 c	-	-	-
PP	8,74 ±0,15 a	1,64	49	0,033
P5	5,58 ±0,43 b	-1,52	5	-0,304
P8	8,35 ±0,33 a	1,25	8	0,156

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há

cincos anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de letras minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

As gramíneas forrageiras vêm sendo empregadas como condicionadores de solo, pois sua capacidade de produção de biomassa, exploração e cobertura do solo contribui sobre os atributos do solo, protegendo-o da ação erosiva. Em condições tropicais quando manejadas demonstram maior potencial de incremento sobre os estoques de CT e NT como observados em diferentes estudo pelo país (SALTON et al., 2014; GUARDIOLA et al., 2017; SARTO et al., 2020; ZEFERINO et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022). Damian et al. (2021), relatam que quando realizado um manejo sustentável de pastagens pode-se aumentar os estoques de C do solo em torno de 0,4-0,95 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, além disso segundo Pedrinho et al. (2020), verificaram que a conversão de floresta em pastagem de certa forma aumentou a abundância de diferentes grupos microbianos relacionados à fixação de nitrogênio, conseqüentemente maior estoque de N.

Batjes e Dijkshoorn (1999), estimaram um potencial de estocagem de 61,3 Mg ha⁻¹ e 6,8 Mg ha⁻¹ de CT e NT, respectivamente, em Plintossolos dentro da Amazônia legal, portanto, os resultados encontrados no presente estudo para o CT foram em média 62,59% inferior, já em relação ao NT foram 9,45% superior. Já com Santos et al. (2018a), em um Plintossolo da Amazônia Maranhense foram encontrados valores de estoques de C de 43 e 44 Mg ha⁻¹ sobre a floresta secundária e pastagem, respectivamente, bem próximo dos valores encontrados no presente estudo.

Analisando a abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ foi possível observar na área PP o maior enriquecimento, P5 e P8 comportamento intermediário e na FS o menor enriquecimento (Tabela 6). Pelos resultados encontrados mesmo após 52 anos desde a implantação da pastagem perene, apenas na camada superficial pode-se observar enriquecimento de $\delta^{13}\text{C}$ característico de plantas C4 (-6 a -19‰) e nas demais camadas e áreas estudadas valores de discriminação normal de plantas C3 (-22 a -34‰). Grant et al. (2022), ao avaliarem a persistência do C do solo, verificaram comportamento de maior enriquecimento na superfície e menor em profundidade de $\delta^{13}\text{C}$ da conversão de floresta em pastagem, similar ao encontrado no presente estudo.

Já a abundância natural de $\delta^{15}\text{N}$ foi verificado na área P5, embora não tenha diferido das demais em alguns casos (Tabela 6), de modo geral teve o maior enriquecimento, possivelmente devido aos efeitos do preparo inicial que expôs o C e N aos microrganismos uma vez que essa variável pode ser empregada como indicadora do grau de decomposição de compostos nitrogenados e da matéria orgânica (GUARESCHI et al., 2014; PEGORARO et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2021; SIQUEIRA-NETO et al., 2021). Enquanto, os menores valores de $\delta^{15}\text{N}$ é um indicativo de incremento sobre a humificação da MOS, pois o enriquecimento

ocorre em virtude da discriminação durante as transformações, como mineralização/imobilização e desnitrificação/nitrificação, uma vez que os microrganismos tem preferência do ^{14}N por ser mais leve em detrimento do ^{15}N que é mais pesado (PEGORARO et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2021; SIQUEIRA-NETO et al., 2021).

Tabela 6 - Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) e $\delta^{15}\text{N}$ (‰) ao longo do perfil do solo em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Camadas (m)	Manejos							
	FS	PP	P5	P8	FS	PP	P5	P8
	^{13}C (‰)				^{15}N (‰)			
0,00-0,10	-26,36 c	-19,43 a	-22,85 b	-23,36 b	5,76 a	5,93 a	5,90 a	5,71 a
0,10-0,20	-25,53 c	-21,50 a	-23,85 b	-23,92 b	7,87 ab	6,89 c	8,66 a	7,79 ab
0,20-0,30	-25,47 c	-22,19 a	-23,74 b	-23,87 b	9,53 a	6,47 b	9,28 a	7,78 ab
0,30-0,40	-24,64 b	-22,83 a	-24,10 b	-24,03 b	6,03 b	6,70 b	9,53 a	7,79 ab
0,40-0,60	-24,64 c	-23,07 a	-24,05 b	-24,28 bc	5,37 b	8,02 a	8,42 a	5,80 b
0,60-0,80	-24,72 c	-23,05 a	-23,91 b	-23,87 b	5,41 a	7,08 a	7,60 a	6,24 a
0,80-1,00	-24,97 b	-23,52 a	-24,07 a	-23,89 a	5,15 b	7,87 a	7,90 a	4,73 b

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de letras minúsculas na linha, entre camadas, não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Nas áreas de FS e P8 foram observados menor enriquecimento em profundidade e esse mesmo comportamento foi observado também por Piccolo et al. (1996), ao analisar a abundância natural de $\delta^{15}\text{N}$ em solos de florestas e pastagens na bacia Amazônica, e segundo esses autores seria devido a iluviação de nitrato empobrecido desse isótopo.

Embora as pastagens tenham apresentado sempre os maiores enriquecimento quando comparado a floresta secundária houve baixa mudança de sinal da $\delta^{13}\text{C}$, e ao longo do perfil essa discriminação foi ficando cada vez menor, indicando preservação do C original oriundo da floresta mesmo após tantos anos desde sua conversão, provavelmente devido ao aumento de argila em profundidade (Tabela 1), que tendem a forma fortes interações com os compostos orgânicos, preservando-os contra a decomposição (KOPITTKKE et al., 2020). Além disso, pode-se inferir que embora as áreas de pastagem não tenham diferido em relação aos teores e estoques de C quando comparado a floresta (Tabela 4, 5) o aporte de resíduos vegetais oriundos de gramíneas serviu como fonte primária aos microrganismos preservando o C original, o que pode ser confirmado quando observamos a contribuição dos diferentes ciclos e verificar-se que 54,14% a 97,10% do C do solo é proveniente das plantas C3 (Tabela 7).

Tabela 7 - Contribuição isotópica de carbono por diferentes tipos fotossintéticos de plantas ao longo do perfil do solo em diferentes manejos na Amazônia Maranhense

Camadas (m)	Áreas						
	FS		PP		P5		P8
	C3 (%)	C3 (%)	C4 (%)	C3 (%)	C4 (%)	C3 (%)	C4 (%)
0,00-0,10	100,00 a	54,14 c	45,86 A	76,79 b	23,21 B	80,13 b	19,87 B
0,10-0,20	100,00 a	69,74 c	30,26 A	87,42 b	12,58 B	87,91 b	12,09 B
0,20-0,30	100,00 a	75,32 c	24,68 A	86,99 b	13,01 B	87,96 b	12,04 B
0,30-0,40	100,00 a	85,44 c	14,56 A	95,41 b	4,59 B	95,04 b	4,96 B
0,40-0,60	100,00 a	87,34 c	12,66 A	95,28 b	4,72 B	97,10 ab	2,90 B
0,60-0,80	100,00 a	86,62 c	13,38 A	93,48 b	6,52 B	93,21 b	6,79 B
0,80-1,00	100,00 a	88,69 c	11,31 A	92,99 b	7,01 A	91,57 bc	8,43 A

Nota. FS: Floresta secundária, PP: Pastagem perene, P5: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, P8: Pastagem perene recuperada e formada há cinco anos atrás pelo consórcio de milho + *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Médias seguidas de letras minúsculas na linha entre as áreas para C3 e letras maiúsculas na linha entre as áreas para C4 não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

A área de PP apresentou as maiores contribuições de C oriunda das plantas C4, variando de 11,31 a 45,86%, quando comparada às demais pastagens, 4,59 a 23,21% e 2,90 a 19,87% para P5 e P8, respectivamente, assim como a que houve a maior redução da contribuição das plantas C3 em razão do tempo de implantação (Tabela 7). A proteção do C de origem C3 observado dentro das pastagens recuperadas pode ter relação aos ciclos de retomada da vegetação natural comum na região e como manejo os produtores tendem a roçar as pastagens adicionado resíduos pouco enriquecidos de ^{13}C , além disso, no estado há dominância da palmeira de babaçu que são protegidas por lei e apresentam altas densidades e que colabora para a manutenção do C original.

Durigan et al. (2017), ao avaliarem o efeito da conversão da floresta em diferentes usos, observaram que pastagens com 10 e 20 anos na Amazônia Oriental baixa mudança isotópica na camada de 0,00-0,10 m dentro da fração orgânica associada aos minerais de silte e argila, indicando proteção do C original da floresta. Chalk et al. (2021), ao analisar diferentes estudos verificaram mudanças dos padrões de origem de C em superfície de 5 a 40%, influenciado pela espécie, condições edáficas e as condições ambientais, como temperatura e precipitação.

Diante disso, acredita-se que devido às condições climáticas da região que apresenta a separação de dois períodos bem definidos, um chuvoso (dezembro a junho) e outro seco (julho a novembro), ocasionando, portanto, uma diminuição da atividade biológica pela escassez de

água o que contribuiria para a preservação da MOS uma vez que diminuir a decomposição/mineralização da mesma.

6.5 CONCLUSÕES

A conversão da floresta secundária para pastagem perene não ocasionou diferenças em relação aos teores e estoques de carbono, enquanto em relação aos teores e estoques de nitrogênio foram observados aumentos no solo.

A recuperação da pastagem há oito anos apresentou resultados superiores à pastagem perene e a floresta contribuindo para a capacidade de melhoria de estocagem de carbono e nitrogênio do solo.

Pela abundância isotópica do carbono (^{13}C) foram identificados padrões de pouco enriquecimento observado dentro das áreas de pastagens, indicando que as deposições ocorridas nestes ambientes foram utilizadas pelos microrganismos, o que colaborou para a preservação do carbono original. Já para a abundância isotópica do nitrogênio (^{15}N) a pastagem recuperada há cinco anos apresentou os maiores enriquecimento, conseqüentemente, menores teores e estoques de carbono e nitrogênio reflexo do preparo inicial e ao pouco tempo para verificar seus benefícios.

6.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. J.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2014.

ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; JANTALIA, C.P.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Eds). **Processos biológicos no sistema solo-planta: Ferramentas para uma agricultura sustentável**. Brasília: Embrapa-SCT, 2005. p.343-350.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; SILVEIRA, A. L. R.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J.; MADARI, B. E. Biological soil properties in integrated crop-livestock-forest systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.41, n.1, p.e0160209, 2017.

BALESDENT, J.; MARIOTTI, A.; GUILLET, B. Natural ^{13}C abundance as a tracer for soil organic matter dynamics studies. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, n.1, p.25-30, 1987.

BATJES, N. H.; DIJKSHOORN, J. A. Carbon and Nitrogen stocks in the soil of the Amazon Region. **Geoderma**, v.89, n.1-3, p.273-286, 1999.

BIELUCZYK, W., PICCOLO, M. C., PEREIRA, M. G., MORAES, M. T., SOLTANGHEISI, A., BERNARDI, A. C. C., PEZZOPANE, J. R. M., OLIVEIRA, P. P. A., MOREIRA, M. Z., CAMARGO, P. B., DIAS, C. T. S., BATISTA, I., CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v.371, n.6, p.114368, 2020.

CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; PAIXÃO, L. S.; LOURENÇO, F., CARDOZO, E. G.; RODRIGUES, T. O.; SILVA, H. R.; MEDINA, J.; SOUSA, T. M. C.; ROCHA, A. E.; REIS, F. O. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, v.94, n.5, p.1781-1792, 2020.

CHALK, P.; BALIEIRO, F.; CHEN, D. Quantitative estimation of carbon dynamics in terrestrial ecosystems using natural variations in the $\delta^{13}\text{C}$ abundance of soils and biota. In: Sparks, D. L. (ed). **Advances in Agronomy**. London: Academic Press, v.167, 2021. p.63-104.

DAMIAN, J. M.; MATOS, E. S.; PEDREIRA, B. C.; CARVALHO, P. C. F.; PREMAZZI, L. M.; WILLIAMS, S.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. E. P. Predicting soil C changes after pasture intensification and diversification in Brazil. **Catena**, v.202, n.7, p.105238, 2021.

DURIGAN, M.R.; CHERUBIN, M.R.; DE CAMARGO, P.B.; FERREIRA, J.N.; BERENGUER, E.; GARDNER, T.A.; BARLOW, J.; DIAS, C.T.S.; SIGNOR, D.; JUNIOR, R.C.O.; CERRI, C.E.P. Soil Organic Matter Responses to Anthropogenic Forest Disturbance and Land Use Change in the Eastern Brazilian Amazon. **Sustainability**, v.9, n.3, p.1-16, 2017.

FERREIRA, C. R.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. R.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Diversity of the edaphic macrofauna in areas managed under no-tillage for different periods. **Semina: Ciência Agriárias**, v.40, n.2, p.599-610, 2019.

FERREIRA, C. R.; NETO, E. C. S.; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. R.; ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil & Tillage Research**, v.198, n.4, p.104533, 2020.

FUJISAKI, K.; PERRIN, A. S.; DESJARDINS, T.; BERNOUX, M.; BALBINO, L. C.; BROSSARD, M. From forest to cropland and pasture systems, a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazônia. **Global Change Biology**, v.21, n.7, p.2773-2786, 2015.

GRANT, K. E.; GALY, V. V.; HAGHIPOUR, N.; EGLINTON, T. I.; DERRY, L. A. Persistence of old soil carbon under changing climate: The role of mineral-organic matter interactions. **Chemical Geology**, v.587, n.1, p.120629, 2022.

GUARDIOLA, M. D. E.; VALE JÚNIOR, J. F.; SILVA, E. E.; ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G. Chemical and physical fractions of soil organic matter under various management regimes in Roraima, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v.38, n.4, suplemento 1, p.2419-2432, 2017.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Carbon, nitrogen and natural abundance of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the chronosequence of no-tillage agricultural in the cerrado of Goiás, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.4, p.1135-1142, 2014.

HEYN, N.; JOERGENSEN, R. G.; WACHENDORF, C. Soil organic C and N stocks in the first rotation of poplar plantations in Germany. **Geoderma Regional**, v.15, n.3, p.e00211, 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento_cobertura_uso_terra/v1/. Acesso em: 13/08/2021.

INPE - NATIONAL INSTITUTE FOR SPACE RESEARCH. **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites** - sistemas Prodes, Deter, Degrad e Queimadas. São José do Campos: INPE, 2020. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes> Acesso em: 13/08/2021.

KOPITTKE, P. M.; DALAL, R. C.; HOESCHEN, C.; LI, C.; MENZIES, N. W.; MUELLER, C. W. Soil organic matter is stabilized by organo-mineral associations through two key processes: The role of the carbon to nitrogen ratio. **Geoderma**, v.357, n.1, p.113974, 2020.

MARANHÃO. **Atlas do Maranhão**. Secretaria de Estado do Planejamento e Orçamento, Núcleo Geoambiental UEMA. São Luís: SEPLAN, 2013. 90p.

MARTINS, L. F.B. N.; TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; SOUZA, C. B.S.; FARIAS, P. G.S.; OZÓRIO, J.M. B.; MARRA, L. M.; CASTILHO, S. C. P. Soil carbon stock in different uses in the southern cone of Mato Grosso do Sul. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 7, n. 4, p.86-94, 2020.

MOSIER, S.; APFELBUAM, S. BYCK, P.; CALDERON, F.; TEAGUE, R.; THOMPSON, R. COTRUFO, M. F. Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in southeastern U.S. grazing lands. **Journal of Environmental Management**, v.288, n.6, p.112409, 2021.

NEILL, C.; PICCOLO, M. C.; MELILLO, J. M.; STEUDLER, P. A.; CERRI, C. C. Nitrogen dynamics in Amazon Forest and pasture soils measured by ¹⁵N pool dilution. **Soil Biology and Biochemistry**, v.31, n.4, p.567-572, 1999.

OLIVEIRA, N.; SCHIAVO, J.; LIMA, M.; LARANJEIRA, L.; NUNES, G.; DA CRUZ, S. Isotopic variations of carbon and nitrogen and their implications on the conversion of Cerrado vegetation into pasture. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, v.56, n.2, p. 266-273, 2021.

OLIVEIRA, H. M. R.; SANTOS, A. C.; LEITE, R. C.; OLIVEIRA, L. B. T.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, T. S. Repercussion of pastoral systems in C and N fractions stock in northeast Amazonia. **Catena**, v.208, n.1, p.105742, 2022.

PEDRINHO, A.; MENDES, L. M.; MERLOTI, L. F.; ANDREOTE, F. D.; TSAI, S. M. The natural recovery of soil microbial community and nitrogen functions after pasture abandonment in the Amazon region. **FEMS Microbiology Ecology**, v.96, n.9, p.fiaa149, 2020.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; FONSECA, S. The ¹⁵N natural abundance and nitrogen forms in Ultisol cultivated with eucalyptus and acacia. **Ciência Florestal**, v.26, n.1, p.295-305, 2016.

PICCOLO, M. C.; NEILL, C.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C.; STEUDLER, P. A. ^{15}N natural abundance in forest and pasture soils of the Brazilian Amazon Basin. **Plant and Soil**, v.182, n.5, p.249-258, 1996.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Austria: Vienna, 2021.

RIOS, L. **Estudos de Geografia do Maranhão**. São Luís: Gráphis Editora, 2001. 50 p.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. 6 p. (Comunicado técnico 198).

SANTOS, C. C.; FERRAZ JUNIOR, A. S. L.; SÁ, S. O.; MUÑOZ GUTIÉRREZ, J. A.; BRAUN, H.; SARRAZIN, M.; BROSSARD, M.; DESJARDINS, T. Soil carbon stock and Plinthosol fertility in smallholder land-use systems in the eastern Amazon, Brazil, **Carbon Management**, v.9, n.6, p.655-664, 2018a.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018b. 356p.

SARTO, M. V. M., BORGES, W. L. B., BASSEGIO, D., PIRES, C. A. B., RICE, C. W., ROSOLEM, C. A. Soil microbial community, enzyme activity, C and N stocks and soil aggregation as affected by land use and soil depth in a tropical climate region of Brazil. **Archives of Microbiology**, v.202, n.6, p.2809-2824, 2020.

SILVA JÚNIOR, C. H. L.; CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; DE MOURA, E. G.; VARGA, I. V. D.; MARTINEZ, C.; MARTINS, M. B. Amazon Forest on the edge of collapse in the Maranhão State, Brazil. **Land Use Policy**, v. 97, n.9, p.104806, 2020.

SIQUEIRA-NETO, M.; POPIN, G. V.; PICCOLO, M. C.; CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; CAMARGO, P. B.; BERMOUX, M. Impacts of land use and cropland management on soil organic matter and greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **European Journal of Soil Science**, v.72, n.3, p.1431-1446, 2021.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573p.

TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; MARTINS, L. F. B. N.; OZÓRIO, J. M. B.; CASTILHO, S. C. P.; MARRA, L. M. Organic carbon and carbon stock in soil in different management systems. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n.4, p.1447-1469, 2020.

YDOYAGA, D. F.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; DEBEUX JÚNIOR, J. C. B.; SILVA, M. C.; SANTOS, V. F. FERNANDES, A.P. M. Recovery methods of *Brachiaria decumbens* Stapf. pastures in the Agreste region of Pernambuco State. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.35, n.3, p.699-705, 2006.

ZEFERINO, L. B. FILHO, FILHO, J. F. L.; SANTOS, A. C.; CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, T. S. Simulation of changes in C and N stocks with land use and cover in Amazon Forest-Cerrado transition environment. **Geoderma**, v.404, n.15, p.115388, 2021.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implantação de pastagem no Estado do Maranhão, principalmente aquelas situadas dentro do território da Amazônia Legal, é uma realidade culturalmente incentivada inicialmente por meio de políticas de incentivos para aumentar a produção dentro do estado. No entanto, o desmatamento da floresta para estabelecimento das pastagens por muitos anos foi realizado de forma a não respeitar a capacidade e aptidão das áreas, levando-as ao processo de degradação do solo, diminuição da produtividade e rentabilidade das áreas.

A necessidade de entender os impactos edáficos da mudança de vegetação é de extrema importância para mitigar os efeitos deletérios sobre a produtividade e qualidade do solo. A atenção nos últimos anos sobre as áreas de floresta Amazônica tem levado muitos a tentar entender os efeitos direto e indireto da mudança de manejos nesta região e o impacto produtivo para o agroecossistema.

Por meio do presente estudo foi possível encontrar que a recuperação e formação de pastagens por meio da integração lavoura pecuária proporcionou melhorias sobre os diferentes atributos químicos, físicos e biológicos do solo superando, em alguns casos, a floresta secundária e a pastagem perene. Outro importante resultado encontrado foi que embora a pastagem perene em cultivo tradicional da região proporcionou aumentos dos teores e estoques de carbono orgânico total e frações recalcitrantes, no entanto, pelo índice de manejo de carbono foi possível demonstrar que isso tem ocorrido de forma desequilibrada em relação a qualidade e disponibilidade de resíduos orgânicos lábil.

O processo de recuperação de pastagem promoveu melhorias nas diferentes frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo, contribuindo para a capacidade de melhoria de estocagem de carbono e nitrogênio do solo. Apresentando-se como alternativa de manejo do solo benéfico para a região da Amazônia Maranhense. Além disso, foi possível observar também pela abundância isotópica do carbono padrões de pouco enriquecimento observado dentro das áreas de pastagens, indicando que as deposições ocorridas nestes ambientes recuperados foram utilizadas pelos microrganismos, o que colaborou para a preservação do carbono original.

Portanto, o conjunto de variáveis empregadas neste estudo demonstraram eficiência sob as principais mudanças no ambiente edáfico proporcionadas pela pastagem estabelecidas da forma tradicional do estado. Pode-se observar que mesmo pastagens implantadas de forma não sustentável podem apresentar altos teores totais de carbono, no entanto, ao verificar mais a fundo percebeu-se que necessariamente não refletia na questão de qualidade do solo. Pois os

teores dentro de frações lábeis estavam sempre mais baixos, indicando deposição reduzida de resíduos vegetais.

Por outro lado, foi possível observar que a recuperação e estabelecimento de novas pastagens por meio de sistema integrado de produção agropecuária são alternativas a serem adotadas para a região estudada. Esse sistema de produção mostrou-se eficiente para a melhoria do ambiente edáfico, assim como, para a manutenção dentro dos diferentes compartimentos da matéria orgânica do solo. Com isso mostrar-se como alternativa assertiva para potencializar o acúmulo de carbono e nitrogênio, além de melhorar a qualidade da matéria orgânica do solo, proporcionando resultados que podem ser equiparáveis e, ou, melhores que ao ambientes de floresta secundária.