



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA BACHARELADO

RODRIGO BARBOSA SILVA

**MATÉRIA ORGÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE PLINTOSSOLO
ARGILÚVICO DISTRÓFICO TÍPICO EM DIFERENTES AGROSSISTEMAS NA
AMAZÔNIA MARANHENSE**

SÃO LUÍS

2021

RODRIGO BARBOSA SILVA

**MATÉRIA ORGÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE PLINTOSSOLO
ARGILÚVICO DISTRÓFICO TÍPICO EM DIFERENTES AGROSSISTEMAS NA
AMAZÔNIA MARANHENSE**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia Bacharelado do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Cavalcante Muniz

Coorientador: MSc. Victor Roberto Ribeiro Reis

SÃO LUÍS

2021

Silva, Rodrigo Barbosa.

Matéria orgânica e atributos físicos de Plintossolo Argilúvico Distrófico típico em diferentes agrossistemas na Amazônia maranhense / Rodrigo Barbosa Silva. – São Luís, 2021.

48 f

Monografia (Graduação) – Curso de Agronomia, Universidade Estadual do Maranhão, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Cavalcante Muniz.

1.Agrossistemas tropicais. 2.Intensificação da agricultura. 3.Qualidade do solo. I.Título.

CDU: 631.41/.43(812.1)

RODRIGO BARBOSA SILVA

**QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLO
FRÁGIL SOB DIFERENTES USOS DA TERRA NA AMAZÔNIA MARANHENSE**

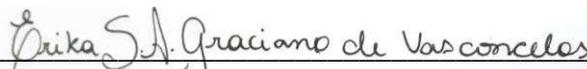
Monografia apresentada ao Curso de
Agronomia Bacharelado do Centro de Ciências
Agrárias da Universidade Estadual do
Maranhão, como requisito para obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo

Aprovada em: 30/08/2021

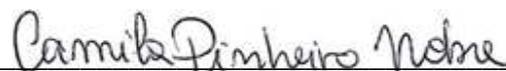
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Luciano Cavalcante Muniz – Orientador
Doutor em Agronomia (Ciência Animal) – UFG
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA



Prof. Dra. Erika Socorro Alves Graciano de Vasconcelos
Doutora em Agronomia (Ciência do Solo) - UFRPE
Instituto Nacional do Semiárido - INSA



Prof. Dra. Camila Pinheiro Nobre
Doutora em Agronomia (Ciência do Solo) - UFRRJ
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

*A minha mãe, Nilcilene Boais Barbosa, minha avó, Sebastiana Boais e
minha bisavó, (in memoriam) Antônia de Jesus, por
todo amor e por serem a minha motivação.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, por estar sempre iluminando e guiando meu caminho.

A minha família, por todo apoio e por sempre acreditar nos meus objetivos, mesmo quando não sabiam os motivos. A minha mãe, por tudo amor, por ser o motivo de tudo, por ser minha inspiração e por todos os esforços que fez para eu chegar até esse momento.

Ao meu orientador e amigo, professor Luciano Cavalcante Muniz, por quem tenho grande admiração e respeito, agradeço por todas as oportunidades que fazem de mim um profissional melhor.

Às professoras Marlen Barros e Kátia Pereira, por todos os ensinamentos e oportunidades.

Ao GINTEGRA, por me permitir o privilégio de fazer parte de um dos maiores e mais respeitados grupos de pesquisa do Maranhão.

Ao meu coorientador Victor Ribeiro, por toda ajuda, orientação e suporte na condução deste trabalho.

Aos amigos do grupo Cientistas, Maycon Pedrosa, Caio Sales, Hidelbrando Pimenta e Marianne Peixoto, por toda amizade e momentos de descontração.

A todos os amigos que fiz durante a graduação: Matheus Barata, Tharcisio Campos, Karol Carvalho, Iago Três, Romão Neto, Ruan Íthalo, Mayara Menezes, Aldineide, Vitória Karla, Amanda, Avelina, Daniel, Ramon e a todos da turma 2016.

A Maria Gabriella, por todo amor, força, companheirismo e por compreender os meus momentos de ausência.

Ao chefe do Laboratório de Física do Solo, Josael Monteiro, por todo suporte na realização as análises.

A Universidade Estadual do Maranhão e a FAPEMA, pelas concessões de bolsa de iniciação científica e financiamento da pesquisa.

A todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente durante toda a graduação e na condução deste trabalho.

Muito obrigado!

*Os que confiam no Senhor são como o monte Sião, que não se pode abalar, mas
permanece para sempre.*

Salmos 125:1

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade da matéria orgânica e os atributos físicos de um solo frágil sob diferentes usos da terra, visando estabelecer uma proposta de agrossistema sustentável para substituição de cultivos convencionais na Amazônia maranhense. O experimento foi conduzido em quatro usos da terra: I) Mata secundária (MS); II) Pastagem convencional (PC); III) Lavoura convencional (LC) e IV) Sistema agrossilvipastoril (SASP) durante o ano agrícola de 2019/2020, no município de Pindaré Mirim, MA, Brasil. Para avaliação dos atributos físicos do solo, foram abertas cinco minitrincheiras de 30x30x30 cm em cada uso da terra, distribuídas de forma aleatória, para coleta de amostras indeformadas para determinação de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo. Amostras deformadas compostas foram também coletadas em cada uma das áreas nas profundidades de 0-15 e 15-30 cm com o uso de um trado holandês, para análise das frações orgânicas carbono orgânico total - COT, carbono orgânico particulado - COP e carbono orgânico associado aos minerais - COAM. Os maiores valores de macroporosidade e porosidade total foram observados na mata secundária, com 0,16 e 0,48 m^3m^{-3} , respectivamente, na profundidade 0-15 cm. Os maiores valores de microporosidade foram observados no sistema agrossilvipastoril (0,36 m^3m^{-3}) e pastagem (0,36 m^3m^{-3}), na profundidade 0-15cm. A densidade revelou menor valor na profundidade 0-15 cm na mata (1,34 g cm^{-3}) e maior valor na pastagem (1,53 g cm^{-3}) na profundidade 15-30 cm. Entre as frações de carbono orgânico, o único compartimento influenciado pelos usos da terra foi o carbono orgânico associado aos minerais, superiores no sistema agrossilvipastoril e na mata em contraste aos menores valores na lavoura convencional de milho. Em profundidade, houve um declínio nos teores e estoques de carbono para todas as frações analisadas. Entre os usos da terra avaliados, os sistemas agrossilvipastoril proporcionou maior conteúdo da fração mais estável da matéria orgânica quando comparada a pastagem convencional. Maiores teores de COAM foram observados no sistema agrossilvipastoril e na mata em contraste a lavoura convencional de milho. Densidade do solo e o COAM mostraram-se ser mais sensíveis às mudanças causadas pelos diferentes usos do solo. O sistema agrossilvipastoril proporcionou maior estabilidade da matéria orgânica quando comparado aos sistemas convencionais. É necessário um maior tempo de avaliação para identificar se existe interferência dos sistemas agrossilvipastoris na qualidade física do solo.

Palavras-chave: agrossistemas tropicais, intensificação da agricultura, qualidade do solo.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the quality of organic matter and the physical attributes of a fragile soil under different uses of the Earth, aiming to establish a sustainable agrassystem proposal for replacement of conventional crops in the Amazon Maranhense. The experiment was conducted in four uses of soil: I) Secondary Forest (MS); II) conventional pasture (PC); (III) conventional farming (LC) and iv) agrotilvipastoril (SASP) system during the year 2019/2020, in the municipality of Pindaré Mirim, MA, Brazil. For physical evaluation of the soil, five minitrincheirs of 30x30x30 cm were opened in each use of the land, distributed of random liner, to collect tampered ties for macroporosity detention, microporosity, total porosity and soil density. Deformed composite sizes were also collected in each of the areas in the depths of 0-15 and 15-30 cm with the use of a Dutch tract, for analysis of total organic fractions - COT, part organic carbon - COP and organic carbon to minerals - COAM. The highest values of total macroporosity and porosity was observed in the secondary forest, with 0,16 and 0,48 m^3m^{-3} , respecting, in depth 0-15 cm. The highest observed microporosidade values were in the agrotilvipastoril system (0,36 m^3m^{-3}) and pasture (0,36 m^3m^{-3}), in depth 0-15cm. A density revealed lower value in depth 0-15 cm in the woods (1,34 g cm^{-3}) and greater value in pasture (1,53 g cm^{-3}) in depth 15-30 cm. Enter as organic carbine fractions, the only compartment influenced by the uses of the Earth was the organic shit associated with the minerals, superior no agrotilvipastoril and in the forest in contrast to the smaller values in the conventional farming of maize. In depth, there was a decline in the levels and carbon stocks for all as analyzed fractions. Among the uses of the evaluated land, the agrosilvipastoril systems provided greater content of the most stable fraction of organic matter when comparing a conventional pasture. Larger coam levels were superior no agrotilvipostoril and in the forest in contrast a conventional farming of maize. Soil density and the coam have been shown to be more sensitive the density of changes caused by the different uses of the soil. The agrotilvipastoril system provided more stability of organic matter when compared to conventional systems. It is necessary for more evaluation time for identification if there is interference of agrosilvipastoris systems in the physical quality of the soil.

Keywords: tropical agrasses, intensification of agriculture, soil quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Médias mensais dos dados históricos de precipitação pluviométrica (2011-2020) e temperatura e precipitação do ano de estudo das áreas (2020) da região de Pindaré-Mirim, obtidos juntos ao Instituto Nacional de Meteorologia.....	24
Figura 2. Diferentes usos do solo na Fazenda Muniz, Pindaré-Mirim, MA.....	25
Figura 3. Coleta para análise de amostras indeformadas e deformadas: (a) minitrincheira; (b) coleta de amostras indeformadas em anel de Kopeck; (c) coleta de solo até 30 cm de profundidade com trado holandês.....	26
Figura 4. Desenho da área experimental mostrando a distribuição das áreas de uso da terra. .	27
Figura 5. Boxplot dos atributos físicos do solo (macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo) diferentes usos da terra e profundidades em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico no município de Pindaré-Mirim, MA.....	31
Figura 6. Boxplot das frações físicas e estoques de carbono em diferentes usos da terra e profundidades em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico no município de Pindaré-Mirim, MA.....	33
Figura 7. Gráfico biplot dos componentes principais (CP1 e CP2) e agrupamento dos atributos físicos e fracionamento de carbono, em diferente usos da terra e profundidades em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico no município de Pindaré Mirim, MA.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de vegetação, uso e cobertura do Bioma Amazônico Maranhense.	16
Tabela 2. Análise dos autovalores, porcentagem da variância total e variância acumulada explicadas pelos componentes principais dos atributos do solo, em diferentes usos da terra em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico no município de Pindaré Mirim, MA.....	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Geral.....	15
2.2 Específicos	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Agrossistemas da Amazônia maranhense	15
3.2 Solos do tropico úmido	17
3.3 Qualidade física do solo.....	19
3.4. Frações Físicas da Matéria Orgânica do Solo.....	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1 Localização, Clima e Solo da Área de Estudo.....	23
4.2 Sistemas avaliados e históricos de uso	24
4.3 Coletas das Amostras de Solo.....	26
4.4 Determinações analíticas	27
4.4.1 Análises físicas do solo.....	27
4.4.2 Fracionamento físico da matéria orgânica	29
4.5 Análise Estatística.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6. CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

A agropecuária tem papel importante no crescimento da economia brasileira e fornecimento mundial de alimentos. Estima-se que até o ano de 2050 a demanda por alimentos cresça em 46% (GOUEL; GUIMBARD, 2017). Dados apresentados por Marin et al. (2016), indicam que, com o aumento da população mundial, a agropecuária teria que aumentar a produção atual em 60% para atender a demanda.

O aumento da produção não poderá vir baseado unicamente no aumento de área cultivada, as áreas já consolidadas devem aumentar sua produtividade, tendo em vista a maior escassez dos fatores de produção no setor primário (REES et al., 2014). De acordo com a Embrapa (2018), o aumento no preço das terras, a escassez de mão de obra rural e a necessidade de preservação de áreas naturais, solos e água limitam a expansão da fronteira agrícola no Brasil.

Além do desafio do aumento da produção de alimentos, as mudanças climáticas, os danos ambientais e a maior demanda por alimentos são fatores que tornam urgente a consolidação de uma agricultura mais sustentável, assim, é imperativo o uso racional do solo e intensificação da produção (JOHNSON et al. 2016). Para isso, é de fundamental importância que o solo esteja em boas condições, para que ele possa refletir na produtividade e na qualidade dos alimentos produzidos e principalmente, que o sistema possa se aproximar ao máximo da sustentabilidade (FREITAS, 2017).

Vários autores, entre eles Barbosa et al. (2018), Oliveira Filho et al. (2018) e Sales et al. (2018), ressaltam que a transformação de ambientes naturais em ambientes de produção, somada ao manejo inadequado, compromete significativamente a qualidade do solo e influencia na dinâmica de entrada e saída de matéria orgânica do solo (MOS). Rosa et al. (2003) encontraram um declínio no conteúdo de carbono do solo em torno de 20 a 50 %, variando com a profundidade, quando os ecossistemas naturais foram substituídos por sistemas de cultivos.

No Maranhão, o manejo adotado pela maioria dos agricultores familiares é o corte e queima da vegetação natural, aplicado como método de limpeza da terra para cultivo de pastagens ou lavouras de grãos, e então quando o solo se torna infértil, o agricultor muda para um novo campo, estabelecendo-se um círculo vicioso e aumentando a pressão sobre os recursos naturais (MOURA et al., 2018). Outra prática comumente empregada na agricultura maranhense é o preparo da terra através do revolvimento mecânico anual do solo, que aceleram a decomposição de matéria orgânica e deixa o solo suscetível à infertilidade e à degradação. (MOUSSADEK et al., 2014), (REICHERT, et al., 2016a).

Nessa conjuntura, o sistema agrossilvipastoril que é um conjunto de técnicas que integram atividades agrícolas, pecuárias e florestais, em sinergia na mesma área, pode se consolidar como uma alternativa para intensificação ecológica da agricultura nos agroecossistemas tropicais (BONETTI et al. 2017). Entre as vantagens do sistema agrossilvipastoril estão a redução da pressão para desmatamento de novas áreas; melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo; aumento da ciclagem e da eficiência na utilização de nutrientes; redução dos riscos de erosão e melhoria da recarga e da qualidade da água; e mitigação do efeito estufa, resultante da maior capacidade de sequestro de carbono (CORDEIRO et al., 2015).

No entanto, é fundamental a avaliação da sustentabilidade dos diferentes sistemas de produção, por meio de indicadores que permitem mensurar os pontos positivos ou negativos de determinado ecossistema, de modo a auxiliar na condução de um manejo de forma sustentável (CÂNDIDO et al., 2015; GUIMARÃES et al.2015). Essa avaliação é complexa e deve ser realizada em função de um conjunto de indicadores específicos e suas inter-relações, pois indicadores isolados não são suficientes para explicar a perda ou o ganho potencial dos cultivos de determinado solo (BETZEK et al., 2017).

Dentre esses indicadores, os atributos físicos se destacam como um dos principais, devido sua sensibilidade às alterações no manejo do solo, e sua importância para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (SPERA et al., 2009; PILATTI, 2018). Outro atributo capaz de indicar alterações do ambiente edáfico é a MOS através das formas de carbono orgânico predominante, que variam de acordo com as práticas de manejo aplicadas (CARVALHO et al., 2010). A partir do fracionamento físico-granulométrico da MOS, se pode obter duas frações orgânicas: o carbono orgânico particulado (COP) – retido na porção da areia e é composto, principalmente, por resíduos de plantas, em processo de decomposição; e o carbono orgânico associado aos minerais (CAM) - retido nas frações silte e argila (CARMO et al., 2012).

Diante do modelo convencional de conversão da vegetação secundária em pastagens para pecuária de corte extensiva ou áreas agrícolas, que rapidamente atingem o estágio degradação, este trabalho parte da hipótese de que o sistema de agrossilvipastoril pode se consolidar como uma alternativa de agrossistema sustentável adaptado para as condições edafoclimáticas da Amazônia maranhense. Essa hipótese justifica-se devido a reposição e proteção da matéria orgânica no solo proporcionada por esse agrossistema, através da manutenção da biomassa das gramíneas e pelo revolvimento mínimo do solo.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar as frações físicas da matéria orgânica e os atributos físicos de um solo frágil sob diferentes usos da terra, visando estabelecer uma proposta de agrossistema sustentável em substituição aos cultivos convencionais na Amazônia maranhense.

2.2 Específicos

- Detectar mudanças na qualidade física de solo da Amazônia maranhense em função de diferentes usos da terra;
- Determinar a mudança na qualidade da matéria orgânica de solo da Amazônia maranhense em diferentes usos da terra;
- Fornecer subsídios para definição de sistemas racionais de manejo dos solos da Amazônia maranhense.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Agrossistemas da Amazônia maranhense

Dos 331.983 km² do estado do Maranhão, 110,4 mil km² é coberto pelo bioma amazônico, mas 75% da cobertura florestal foi liberada para fornecer espaço, principalmente, para a agricultura e pecuária (INPE, 2016). Segundo e MME (2018), o estado do Maranhão apresenta apenas 34% de Bioma Amazônico em seu território, no entanto, bastante devastado, principalmente pelo fato de encontrar-se em grande parte no arco do desmatamento.

Durante as campanhas de campo no território delimitado como Bioma Amazônico, com registro dos tipos de vegetação e usos do solo observados, classificados de acordo com o Manual Técnico da Vegetação Brasileira do IBGE (2012), foi possível registrar 31 tipos de classes entre tipos de vegetação, bem como uso e cobertura. O tipo de vegetação com maior área proporcional foi Vegetação Secundária com palmeiras, abrangendo uma área de 34.064 km², equivalente a 24,69% da área total do Bioma Amazônico Maranhense, seguido da tipologia Pastagem e Vegetação Secundária com palmeiras, com 33.839 (24,53%) (Tabela 1).

Tabela 1: Tipos de vegetação, uso e cobertura do Bioma Amazônico Maranhense.

CLASSE	ÁREA (km ²)	ÁREA DO BIOMA (%)
Vegetação Secundária com Palmeira	34.064,42	24,69
Pastagem e Vegetação Secundária com palmeiras	33.839,02	24,53
Pastagem	11.175,67	8,10
Agricultura	11.112,27	8,05

Fonte: ZEE/MA, 2018.

A agricultura itinerante ou de corte e queima, prática que consiste na conversão de florestas nativas em áreas agrícolas pelo uso do fogo, no qual a vegetação é cortada e queimada para realização do plantio de culturas agrônômicas sobre as cinzas é uma das principais práticas agrícolas utilizadas na região da Amazônia maranhense (LEITE et al., 2016). Esse manejo se repete pelos pequenos agricultores para o cultivo sobre as cinzas de culturas agrícolas tais como, arroz, milho, feijão e mandioca, assim como pelos grandes proprietários de terras para a implementação de pastagens extensivas, e então, quando o solo se torna infértil, o agricultor muda para um novo campo, estabelecendo-se um círculo vicioso em que as carências aumentam a pressão sobre os recursos naturais e a degradação crescente dos recursos aumentam a carência (MOURA et al., 2009; MOURA et al., 2016a; MOURA et al., 2018; SENA, 2020).

Outra prática comumente empregada na agricultura maranhense é o preparo da terra através do revolvimento mecânico anual do solo. O preparo convencional do solo expõe a matéria orgânica a decomposição (MOUSSADEK et al., 2014), devido ao favorecimento da oxigenação no processo de aração, e logo após, ocorre o rearranjo das partículas e recompactação do solo abaixo da profundidade da lavoura (REICHERT, et al., 2016a), o que torna o solo susceptível à erosão hídrica, especialmente no trópico úmido.

O Maranhão apresenta 7,3 milhões de hectares de pastagens (LAPIG, 2017), cerca de 20% está em diferentes estágios de degradação (FILHO et al., 2018). Essa degradação é caracterizada pelo processo evolutivo da perda de vigor, de produtividade e da capacidade de recuperação natural das pastagens de sustentar os níveis de produção e qualidade exigidos pelos animais (DIAS-FILHO, 2017). Nas pastagens infestadas por plantas daninhas, mas que ainda mantêm proporção considerável de capim, ou em situações nas quais se planeja a reforma da pastagem, a queima tem sido usada como forma de controlar as plantas daninhas e devolver ao solo parte dos minerais retidos nela (SIMON et al., 2016). Essa relativa facilidade em controlar as plantas daninhas e ainda aumentar a disponibilidade de nutrientes do solo tem sido a principal razão do uso do fogo em pastagens tropicais (CARVALHO et al., 2017).

Apesar do uso do fogo e o revolvimento mecânico anual se destacarem como uma das principais alternativas para implantação de cultivos agrícolas nessa região, é necessário estimular o aumento de produtividade pelo uso racional de recursos naturais e insumos, algo primordial para evitar a necessidade de abertura de novas fronteiras agrícolas. De acordo com GEHRING et al. (2013) e AGUIAR et al. (2014), o maior desafio para sustentabilidade da agricultura nessa região é identificar, reduzir o uso ineficiente dos nutrientes e simultaneamente intensificar a produção, manter a fertilidade do solo e a biodiversidade além de reduzir os impactos ambientais da agricultura.

A pressão constante sobre a produção agrícola aliada à crescente degradação ambiental demonstra a importância de um modelo de intensificação sustentável da agricultura, que se adapte às restrições locais, um conjunto diversificado de práticas multifuncionais e que imitam a estrutura de ecossistemas a partir das observações sobre o funcionamento da natureza, considerando a gestão integrada dos recursos naturais locais (DORÉ et al., 2011; MALÉZIEUX, 2012; LOVELL, 2018). Nessa conjuntura, aparece o sistema agrossilvipastoril, que é uma estratégia de produção sustentável que integra atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais, realizados na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotação, buscando efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema o que possibilita muitos benefícios econômicos e ecológicos que contribuem para o implemento da intensificação sustentável (BALBINO et al, 2011; WILSON; LOVELL, 2016).

O sistema agrossilvipastoril merece destaque como sistema de produção sustentável (BONAUDO et al., 2014; FRANZLUEBBERS et al., 2014), por evitar o desmatamento, respeitar a segurança alimentar e a agricultura sustentável, e levar em consideração um cenário de crescente demanda por alimento e energia, frente a uma disponibilidade cada vez menor de recursos naturais (LEMAIRE et al., 2014; SMITH, 2015) permite a recuperação das propriedades físicas e químicas do solo, pelo sistema radicular abundante e profundo das espécies forrageiras, colaborando ainda com uma maior cobertura vegetal para o solo (ASSIS et al., 2015).

3.2 Solos do trópico úmido

No trópico úmido, construir e manter a fertilidade dos solos é um grandes desafios para os agricultores, bem como para os pesquisadores que se dedicam à implantação de sistemas agrícolas sustentáveis, em virtude da combinação espacial de solos de baixa fertilidade natural, altamente intemperizados e em grande parte, derivados de rochas sedimentares e por isso,

apresentam estrutura frágil, baixa capacidade de retenção de cátions, que resultam na alta taxa de remoção de nutrientes do perfil do solo decorrente da lixiviação (MOURA et al., 2010). Essas características são similares às encontradas nos solos do Maranhão, especialmente aqueles da Formação Itapecuru, que são formados de rochas clásticas e minerais de quartzo-arenito, possuem estrutura frágil e não suportam o uso intensivo exigido pela agricultura de outras regiões do Brasil (MOURA et al., 2008; AGUIAR et al., 2010; CORRÊA-MARTINS et al., 2019).

Os solos dessa região possuem uma alta tendência à coesão, pois, além de características granulométricas que favorecem esse fenômeno, apresentam baixíssimos conteúdos de carbono orgânico e ferro livre, e são submetidos a umedecimento na estação chuvosa (entre janeiro e junho) e depois a secagem, na estação de intenso déficit hídrico (entre julho e dezembro) (SENA, 2020). Culminando em um ciclo de recompactação que reduz a porosidade, com efeitos drásticos sobre a disponibilidade de oxigênio, água e nutrientes e com uma grande redução no enraizamento das culturas e da eficiência de uso dos nutrientes (AGUIAR et al., 2010, DENIELLS, 2012).

Seu caráter de coesão, aliada às características edafoclimáticas dificultam o crescimento radicular das culturas em subsuperfície e conseqüentemente diminui de maneira drástica o uso eficiente dos nutrientes pelas culturas. Este processo prejudica as condições físicas do solo para enraizamento, reduz o volume de solo acessado pelas raízes, prejudica a absorção de água e nitrogênio e diminui a eficiência do nitrogênio e do uso da água (DENIELLS, 2012; SENA, 2020). Devido a textura arenosa, é observada a agregação fraca do solo, com baixa retenção de água, baixos teores matéria orgânica, geralmente inferior a 4% (MOURA et al, 2013), baixos teores de óxidos de ferro e alumínio (FIDALSKI et al., 2013; REICHERT et al. 2016a), alta permeabilidade, susceptibilidade à compactação (REICHERT et al. 2016b) e baixa capacidade de retenção de cátions (MOURA et al., 2018).

A região possui altos índices pluviométricos e altas temperaturas, com duas estações sazonais bem definidas, o período chuvoso de janeiro a junho, e o período seco de julho a dezembro. Essas características aceleram a decomposição da matéria orgânica (KAY, 2018), tornando difícil o manejo destes solos prejudicando a sua fertilidade, que em sua maioria não possuem alta resiliência intrínseca à degradação física devido ao baixo conteúdo de elementos agregadores, como carbono, cálcio e ferro elementar (MOURA et al., 2013; MOURA et al., 2018; SENA, 2020).

3.3 Qualidade física do solo

Na literatura, a citação científica mais antiga à qualidade do solo foi a proposta por Mausel (1971), no qual relacionou a qualidade do solo à produção agrícola, como a capacidade em produzir trigo, soja e milho sob condições de alto nível de manejo, considerando somente as culturas que dominavam a economia na época. No entanto, Doran e Parkin (1994) observaram que essa definição não levou em consideração a capacidade do solo de funcionar de forma sustentável e, portanto, incluíram a contribuição ambiental e a promoção da saúde das plantas, dos animais e dos homens.

Mais recentemente, a qualidade do solo foi associada às propriedades e processos naturais do solo, já que esses estão diretamente ligados à sua capacidade de funcionar efetivamente como componente de um ecossistema saudável (BAI et al., 2018; BÜNEMANN et al., 2018). A respeito disso, Bongiorno et al. (2019) mencionam que o conceito de qualidade do solo pode ser definido como sua capacidade em desempenhar múltiplas funções, sendo essa avaliada por meio de atributos químicos, físicos e biológicos do solo.

Pesquisadores de todo o mundo têm somado esforços significativos para avaliar a qualidade do solo em práticas de manejo, a fim de minimizar os impactos negativos causados pela má gestão do solo (VALLE; CARRASCO, 2018). Avaliar a qualidade do solo em um contexto mais agrícola remete a descobrir como as práticas de manejo interferem na qualidade do solo. Essa avaliação é complexa e deve ser realizada em função de um conjunto de indicadores específicos e suas inter-relações, pois indicadores isolados não são suficientes para explicar a perda ou o ganho potencial dos cultivos de determinado solo (BETZEK et al., 2017).

Dentre os critérios para seleção de indicadores relativos a propriedades do solo, a facilidade de amostragem e medição; existência de métodos padronizados de estimativa; valores de referência conhecidos; baixo custo de análise; sensibilidade a alterações de cobertura e manejo da terra; responsivo às perturbações; e facilidade de interpretação foram características mencionadas por Bünemann et al. (2018). Desses indicadores, os atributos físicos destacam-se como um dos principais, devido sua sensibilidade às alterações no manejo do solo, principalmente quando se utiliza máquinas e implementos agrícolas, e a avaliação desses atributos físicos permite estabelecer a eficiência ou não dos sistemas de manejo quando o objetivo é a melhoria da qualidade do solo.

Na definição de Reynolds et al. (2002), um solo agrícola com boa qualidade física é aquele que é “forte” para manter uma boa estrutura, resistente à erosão e à compactação, mas também dever ser “fraco” o suficiente para permitir o crescimento radicular e colonização da

flora e fauna do solo. E, do ponto de vista das atividades agrícolas, as propriedades físicas do solo são de grande importância por estabelecerem relações fundamentais com os processos hidrológicos, tais como variação da taxa de infiltração, escoamento superficial, drenagem e erosão, além de possuir função essencial no suprimento e armazenamento de água, de nutrientes e de oxigênio no solo (CARDOSO, 2014).

Entre a diversidade de indicadores físicos do solo que refletem a influência do manejo, os mais utilizados são aqueles associados a estrutura do solo, como a porosidade total do solo, macroporosidade e microporosidade, densidade do solo (GOMES et al., 2017). Tais indicadores são importantes para o desenvolvimento das plantas e a atividade de organismo e são correlativos, portanto, a modificação de um deles conseqüentemente leva à modificação de todos os demais (CAMARGO, 2016), por isso, esses indicadores têm sido investigados nas diferentes condições de uso e manejo, pois, são fundamentais para entender os processos de degradação (RAMOS et al., 2014).

O conhecimento da porosidade total é importante para auxiliar a compreender a manutenção de solos agricultáveis, como a passagem de maquinários pesados compacta e reduz a porosidade do solo, e a realização de balanços hídricos, pois a porosidade desempenha influência diretamente na drenagem e aeração (CARMO, 2018; SILVA et al, 2020). Este atributo está estreitamente ligado a dinâmica do armazenamento e do movimento de solutos e de circulação de gases no seu interior, essenciais aos processos bioquímicos das plantas, sobretudo aqueles relacionados com a produtividade vegetal (PAULINO, 2013).

Resultante da organização das partículas do solo, a macroporosidade é um dos melhores parâmetros para detectar a degradação da estrutura do solo por meio do manejo, pois, afeta a difusão de oxigênio, drenagem e desenvolvimento das raízes das plantas no perfil do solo (BAQUERO et al., 2012). Os macroporos ($> 50 \mu\text{m}$), os microporos ($< 50 \mu\text{m}$), são responsáveis pelo armazenamento e retenção de água (VOLK; TRINDADE, 2020).

De acordo com Lima et al. (2007) a porosidade do solo é referida como ideal quando possui em torno de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ do seu volume total, no qual a microporosidade varia entre $0,25$ e $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e a macroporosidade entre $0,17$ e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. É importante ressaltar que a distribuição das classes de poros poderá ser modificada devido à correlação existente entre porosidade e densidade do solo, dessa forma, a proporção de macroporos e microporos serão alteradas e, com isso, as funções do solo de fornecer adequada aeração e quantidade de água suficiente para o crescimento e expansão radicular serão também serão afetadas (PREVEDELLO, 2013).

A densidade do solo (D_s), que é obtida através da relação entre a massa de solo seco e o volume total, é um parâmetro variável afetada em função de diferentes características, como as práticas de manejo, o tipo de cobertura vegetal, resíduos na superfície do solo e matéria orgânica, que modificam a estrutura do solo e, por consequência, o arranjo e o volume dos poros (FERREIRA, 2016; ABDI et al., 2017). Valores críticos de densidade do solo foram propostos por (REICHERT; REINERT; BRAIDE, 2003) para algumas classes texturais: 1,30 a 1,40 g cm^{-3} para solos argilosos, 1,40 a 1,50 g cm^{-3} para os franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 g cm^{-3} para os franco-arenoso.

3.4 Frações Físicas da Matéria Orgânica do Solo

Em termos gerais, a matéria orgânica do solo (MOS) pode ser definida como todo material que contém carbono orgânico no solo (COS), incluindo microrganismos vivos e mortos, resíduos parcialmente decompostos de animais e plantas, seus produtos de decomposição e substâncias orgânicas microbiológicas e / ou quimicamente alteradas (BARTOLY et al., 2018) unidas através de interações hidrofóbicas e pontes de hidrogênio, conformando uma estrutura supramolecular (MUSCOLO; SIDARI; NARDI, 2013). E apesar de estar em pequenas quantidades, quando comparada com a fração mineral, a matéria orgânica no solo é de extrema importância para os sistemas de produção agrícola devido aos diversos efeitos que produz nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (GOMES et al., 2017; CONCEIÇÃO et al., 2017) e por seu efeito no crescimento e desenvolvimento das plantas.

A MOS possui importante papel nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e, em razão disso, o estudo das suas frações lábeis e recalcitrantes têm sido utilizadas como um indicador de qualidade do solo (SOUZA et al., 2018). A ela, têm sido atribuídos benefícios como a reserva de nutrientes requeridos por plantas e micro-organismos, a contribuição efetiva na CTC e, conseqüentemente, na fertilidade do solo, complexação de íons metálicos tóxicos, agregação, infiltração e retenção de água (SOUZA et al., 2018; SILVA, 2020). Cerca de 58% da MOS é constituída por C orgânico (SOUZA et al., 2018), por isso, frequentemente refere-se à determinação deste nos estudos de MOS. Outras funções importantes incluem: a formação de agregados estáveis e proteção da superfície do solo; manutenção da vasta gama de funções biológicas, incluindo a imobilização e liberação de nutrientes; fornecimento de capacidade de troca iônica; e armazenamento de carbono (LADHA et al 2011).

Em muitas regiões do Maranhão, como a periferia amazônica, a sustentabilidade e a viabilidade dos agrossistemas dependem predominantemente de um equilíbrio entre a entrada

e saída de matéria orgânica do solo e a manutenção de uma soma adequada de cátions básicos na zona de crescimento das raízes (QUESADA et al., 2020). Nesta região, a degradação da terra ocorre quando o manejo do solo não pode superar as forças naturais que diminuem o teor de MOS, devido à rápida decomposição, e reduzem o teor de cátions básicos devido à lixiviação intensa (RAMOS et al., 2018). O uso contínuo da área cultivada nos trópicos úmidos, sem esgotamento da fertilidade é uma tarefa difícil, pois depende fortemente do acúmulo e da estabilização de matéria orgânica do solo, aumento da retenção de cátions básicos na zona radicular e melhorias na estrutura do solo (KANNAN et al., 2020).

Vários atributos edáficos, citando em especial a fração orgânica do solo, são facilmente alterados com a mudança da forma de manejo, tornando-os importantes indicadores da qualidade do ambiente edáfico (TROIAN et al., 2020). De acordo com Silva (2020), a pesquisa com MO na agricultura é recente, cujas ações devem ser intensificadas visando melhor quantificar a contribuição dos diferentes ecossistemas, bem como identificar atividades ou práticas com potencial de manutenção e/ou acúmulo de MOS, e pesquisas que tenham como objetivo avaliar o efeito de diferentes sistemas de preparo do solo ou rotação de culturas sobre a MOS pode ser fundamental para caracterizar seu comportamento frente às práticas de uso e manejo do solo.

Com maior conhecimento sobre a quantidade e qualidade do C/MOS sob diferentes formas de manejo, é possível identificar sistemas que contribuem de forma significativa para manutenção/aumento da produtividade das áreas, e também que tragam menores impactos ambientais ao sistema solo (MARQUES et al., 2015; MAGALHÃES et al., 2016; KOVEN et al., 2017).

Segundo Calonego et al. (2012), a conversão de um ecossistema natural para agricultura promove alterações nas taxas de adição e decomposição da MOS, sendo a decomposição intensificada por meio da destruição dos macroagregados. Essa desagregação é promovida principalmente pelas práticas de revolvimento do solo. Com isso, expõe-se a MOS, anteriormente protegida no interior dos macroagregados, à oxidação e ação microbiana, reduzindo seu teor no solo. Para Macedo (2009), a utilização de sistemas integrados pode proporcionar estoques de carbono orgânico do solo igual ou superior aos encontrados em sistemas nativos devido ao emprego de gramíneas tropicais. Tais espécies promovem boa cobertura do solo, produção de palha, estruturação do solo e conseqüente aumento do carbono.

Essa quantificação pode ser realizada através das diferentes frações da matéria orgânica do solo, como o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono associado aos minerais (COAM) (MITTON et al., 2017), que vêm sendo utilizados como indicadores de

qualidade do solo, por serem mais sensíveis às alterações de manejo do que o carbono orgânico total (COT) (FACCIN et al., 2017; LEAL et al., 2016).

Essa metodologia possibilita a separação de compartimentos com diferentes dinâmicas e funções no solo (MONI et al., 2012), e permite analisar a relação entre a composição da MO e a sua localização na estrutura do solo, a também a sua interação com a matriz mineral do solo (CHRISTENSEN, 1992). Na separação das partículas do solo por tamanho, a MOS associada a frações mais grosseiras (como a fração areia) refere-se a MOS de maior labilidade (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; BAYER et al., 2002). Já a MOS associada a frações mais finas (como a fração argila), é considerada como sendo de maior estabilidade (BUYANOVSKY; ASLAM; WAGNER, 1994; BAYER et al., 2001).

O COP corresponde em torno de 3 a 20% do COT do solo e é composto, principalmente, por restos vegetais, animais e fungos em vários estágios de decomposição, apresentando partículas maiores que 0,053mm (SILVA; MENDONÇA, 2007; KLUG, 2014). Esta fração pode apresentar-se em elevadas quantidades na camada mais superficial de solos sob plantio direto, por conta do maior aporte de resíduos em sua superfície. No entanto, o COP pode apresentar-se em maiores quantidades nas camadas inferiores a 0,05m em solos sob plantio convencional, devido à incorporação dos resíduos em profundidade, conforme observado por Amorim (2016).

O COAM, responsável pelas associações com os argilominerais do solo, é o material orgânico em estágio mais avançado de decomposição, é dependente da quantidade de material orgânico que é transferido do COP, apresenta partículas <0,053mm (CONCEIÇÃO, 2006) e em geral esta fração mostra-se menos sensível ao manejo do solo, principalmente no curto prazo (KUNDE et al., 2016).

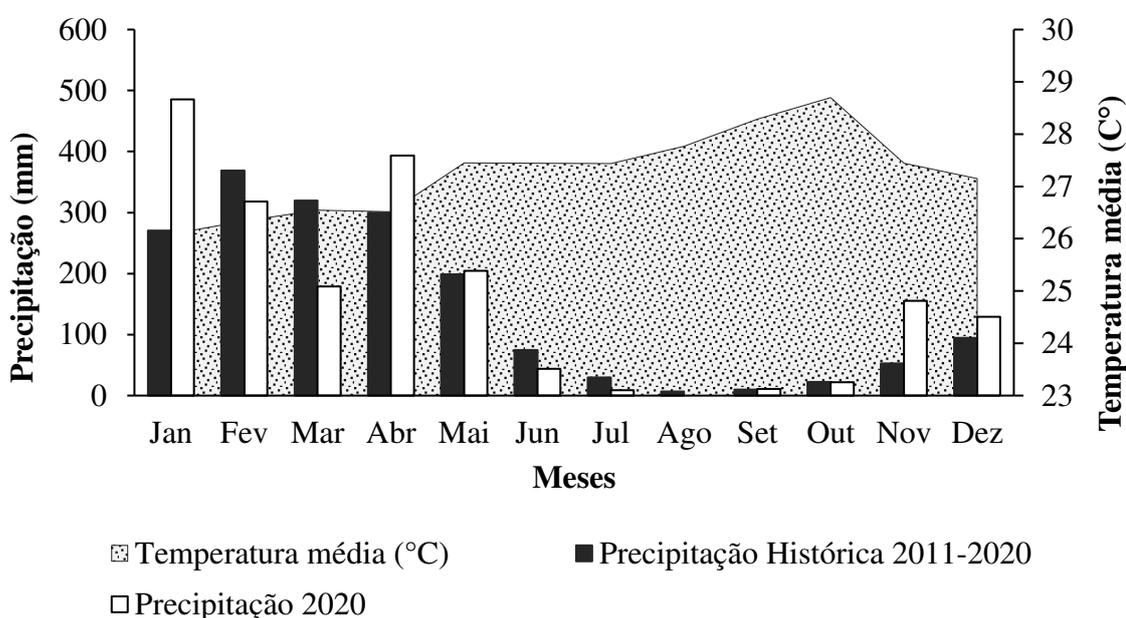
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização, Clima e Solo da Área de Estudo

A pesquisa foi conduzida em diferentes usos do solo na Unidade de Referência Tecnológica da Embrapa Cocais, localizada no município de Pindaré-Mirim (MA), entre as coordenadas geográficas 3° 76' 4.08'' S de latitude, 45° 49' 17.00'' W de longitude e 33m ao nível do mar. O clima da região é do tipo Aw tropical úmido, segundo Köppen (1948), com período chuvoso e seco bem definido, a temperatura média anual de 27 a 26 °C e a precipitação média de 2100 mm ano⁻¹ (Figura 1). A temperatura mínima é de 23 °C, a máxima de 37°C e a temperatura média é de aproximadamente 27°C (INMET, 2021).

Geologicamente, o município encontra-se na Formação Itapecuru, formada no Cretáceo Superior (SANTOS et al., 2013). O solo é classificado como Plintossolo Argilúvico Distrófico típico (GARCIA, 2015), com textura média, e o relevo local apresenta variações entre suave-ondulado a ondulado, recoberto originalmente por vegetação de Floresta Ombrófila Aberta de Terras baixas, com predomínio de palmeira babaçu (*Attalea speciosa* Mart.) e pastagem degradada.

Figura 1. Médias mensais dos dados históricos de precipitação pluviométrica (2011-2020) e temperatura e precipitação do ano de estudo das áreas (2020) da região de Pindaré-Mirim, obtidos juntos ao Instituto Nacional de Meteorologia.



Fonte: INMET, 2021

4.2 Sistemas avaliados e históricos de uso

Foram selecionadas quatro áreas sob diferentes usos (Figura 2): I) Mata secundária (MS), II) Pastagem convencional (PC), III) Lavoura convencional de milho (LC), IV) Sistema Agrossilvipastoril (SASP).

Figura 2. Diferentes usos do solo na Fazenda Muniz, Pindaré-Mirim, MA.



Fonte: BARBOSA; RIBEIRO; FIGUEIREDO, 2020

A lavoura convencional de milho foi implantada em área antes ocupada por pastagem degradada com *Urochloa brizantha* cv. Marandu com aproximadamente 20 anos do seu estabelecimento. Na área total de dois hectares, foram incorporados 1 ton. ha⁻¹ de calcário calcítico e 0,70 ton. ha⁻¹ de gesso agrícola, de acordo com o resultado da análise de solo realizada. O espaçamento utilizado entre plantas e entre linhas foi de 0,50 m, com a densidade de 72.000 plantas por ha⁻¹. Para a adubação de plantio foram utilizados 370 kg ha⁻¹, do formulado 5-25-15 e 120 kg ha⁻¹ de N em cobertura no estágio fenológico V7.

A área com sistema agrossilvipastoril foi implantada em 2016, também em substituição a pastagem degradada. Foram realizadas duas safras de milho híbrido KWS 9304, consorciado com pastagem Marandu para alimentação de bovinos de corte e o componente arbóreo Eucalipto (*Eucalyptus eucalyptos*), clone MA2000 e MA2001 resultado dos cruzamentos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus tereticornis*, em sistema Santa Fé. Foi utilizado 1,0 ton. ha⁻¹ de calcário dolomítico para a primeira safra de milho e utilizou-se o espaçamento de 0,6 m x 0,3 m e para o eucalipto de 3 m x 2 m e 28 m entre fileiras duplas. A partir do ano de 2019, o capim é adubado com uma média de 200 kg ha⁻¹ ano, com uma capacidade de suporte de aproximadamente 4 UA ha⁻¹ ano⁻¹, durante o período chuvoso.

A pastagem convencional é de *Urochloa brizantha* cv. Marandu com aproximadamente 20 (vinte) anos de implantação. A mata secundária com predominância de palmeiras de babaçu (*Attalea speciosa* Mart) foi utilizada como área de referência por apresentar condições mais próximo ao natural.

4.3 Coletas das Amostras de Solo

Em cada uma das áreas estudadas foram abertas três minitrincheiras de 0,30m de profundidade, dispostas aleatoriamente. Em cada minitrincheira foram coletadas amostras indeformadas com anéis volumétricos de Kopeck de 100 cm^{-3} nas profundidades de 0-15 e 15-30cm.

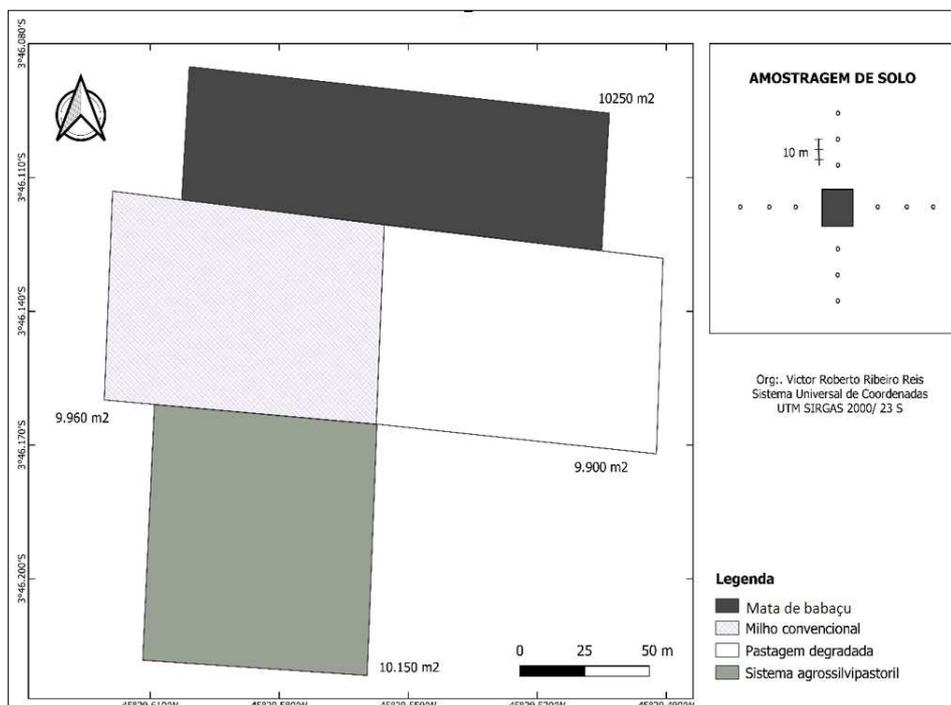
Amostras deformadas compostas foram também coletadas em cada uma das áreas (Figura 4) nas profundidades de 0-15 e 15-30cm com o uso de um trado holandês. Ao redor das minitrincheiras, em todas as direções cardeais, marcou-se doze pontos equidistantes, onde realizou-se a coleta de amostras deformadas (Figura 3). Essas doze amostras de solo deformadas foram combinadas em uma amostra composta para cada profundidade coletada.

Figura 3. Coleta para análise de amostras indeformadas e deformadas: (a) minitrincheira; (b) coleta de amostras indeformadas em anel de Kopeck; (c) coleta de solo até 30 cm de profundidade com trado holandês.



Fonte: SILVA, 2020

Figura 4. Desenho da área experimental mostrando a distribuição das áreas de uso da terra.



Fonte: REIS, 2020

4.4 Determinações analíticas

4.4.1 Análises físicas do solo

As amostras foram levadas ao Laboratório de Física do solo da Universidade Estadual do Maranhão e o procedimento de análise foi realizado conforme descritas no Manual de Métodos de Análise de Solos (TEIXEIRA et al., 2017). As amostras indeformadas foram devidamente saturadas em bandejas plásticas com água até 2/3 da altura dos anéis. Com a finalidade de evitar perda de solo, utilizou-se um tecido sintético, que permitiu apenas a passagem de água, em um dos lados de cada anel, que foi fixado com uma liga de borracha. Após 24 horas de imersão das amostras, quando todos os poros do solo estavam ocupados pela água, as amostras foram pesadas e colocadas na mesa de tensão aplicando-se tensão de 0,60 m de coluna de água (6 kPa), e pesadas após o equilíbrio.

Depois de pesadas, cada repetição foi seca em estufa de circulação fechada a 105 °C por 24 horas ou até atingir massa constante.

A densidade do solo foi obtida através da equação (1):

$$D_s = \frac{m_a}{V}$$

(1)

Em que:

D_s – densidade do solo, em kg dm^{-3} (equivalente a g cm^{-3}).

m_a – massa da amostra de solo seco a $105\text{ }^\circ\text{C}$ até peso constante, em g.

V – volume do cilindro, em cm^3 .

A microporosidade (M_i) foi calculada utilizando o teor de água retido nas amostras equilibradas a 6 kPa. As amostras saturadas foram colocadas sob a mesa de tensão a qual retira a água dos macroporos. Após pesagem, antes e depois de ir à estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$, obteve-se o volume de macro e microporos contidos na amostra (ALMEIDA et al., 2017). Para a determinação da microporosidade, utilizou-se equação (2):

$$M_i = \frac{(a - b)}{c} \quad (2)$$

Em que:

M_i – microporosidade, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

a – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-elástico após equilíbrio com um potencial de 6 kPa (60 cm de coluna de água), em g.

b – massa do solo seco a $105\text{ }^\circ\text{C}$, em g.

c – volume total da amostra, em cm^3 (nesse caso, assume-se que o volume total da amostra é igual ao volume do cilindro).

A porosidade total (PT) foi obtida através do método indireto, assumindo o valor para densidade de partículas em $2,65 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ de acordo com a equação 3:

$$P_t = 1 - \left[\frac{D_s}{D_p} \right] \quad (3)$$

Em que:

P_t – porosidade total, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

D_p – densidade de partículas sólidas do solo, em kg dm^{-3} ;

D_s – densidade do solo, em kg dm^{-3} .

Assim, conhecendo a P_t e a M_i calculou-se a macroporosidade (M_a) através da diferença entre porosidade total e microporosidade, conforme equação 4:

$$M_a = (P_t - M_i) \quad (4)$$

Em que:

Ma – macroporosidade, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

Pt – porosidade total, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

Mi – microporosidade, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

4.4.2 Fracionamento físico da matéria orgânica

O carbono orgânico total (COT) foi determinado por digestão úmida com a mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico, sob aquecimento externo (YEOMANS e BREMNER, 1988). Amostras de 0,5 g de solo seco ao ar trituradas em gral de porcelana e passadas em peneira de malha de 0,2 mm, foram transferidas para um tubo de vidro (100 mL). Em seguida, adicionou-se 5,0 mL da solução de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 0,167 mol L⁻¹ e 5,0 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado.

Logo após, o tubo foi levado ao bloco digestor e pré-aquecido a 170 °C, por 30 minutos. Transcorrido esse tempo, deixou-se o tubo esfriar durante 15 min, e todo o conteúdo foi transferido para um béquer graduado (100 mL), usando água destilada para elevar-se o volume final a 80 mL. Aguardou-se o esfriamento da solução à temperatura ambiente. Posteriormente, foi adicionado 3 gotas de solução indicadora (1,465 g de ortofenantrolina mono-hidratada e 0,695 g de sulfato ferroso (FeSO_4) dissolvidos em 100 mL de água destilada), seguindo-se a titulação com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,2 mol L⁻¹ (sal de Mohr) e anotando o volume gasto após viragem da cor. Procedimento idêntico foi repetido para três amostras-controle (“branco”), sem solo, aquecidas e não aquecidas. A amostra não aquecida foi utilizada para calcular a quantidade de dicromato perdida pelas amostras aquecidas.

O resultado foi obtido por duas fórmulas complementares:

$$A = [(V_{ba} - V_{am}) * ((V_{bn} - V_{ba})) / V_{bn}] + (V_{ba} - V_{am}) \quad (5)$$

Em que:

V_{ba} = Valor médio do volume gasto na titulação do branco controle aquecido;

V_{bn} = Valor médio do volume gasto na titulação do branco controle não aquecido;

V_{am} = Volume gasto na titulação da amostra.

$$\text{CO(g/kg)} = \frac{(A) (\text{molaridade do sulfato ferroso})(3) (1000)}{\text{peso da amostra (mg)}} \quad (6)$$

Em que:

CO = Carbono orgânico total (g/kg)

3 = resultado da relação entre o número de mols de Cr₂O₇ - que reage com Fe²⁺, multiplicado pelo número de mols de Cr₂O₇ - que reagem com o CO, multiplicado pela massa atômica do C (12).

1000 = fator de conversão de unidade (mg.mg⁻¹ para g. kg⁻¹)

O fracionamento granulométrico da MOS foi realizado segundo Cambardella e Elliott (1992), cujo princípio consiste em separar o carbono orgânico do solo em duas frações: carbono orgânico particulado (COP) menos decomposto e mais recentemente depositado no solo, e carbono associado aos minerais (COAM), mais recalcitrante e humificado (SENA, 2020).

Foram pesados 10 gramas de solo seco ao ar peneirados em malha de 2mm em potes de polietileno de 100 ml, e adicionados 40 mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio na concentração de 5 g L⁻¹. Em seguida as amostras foram submetidas à agitação horizontal por 15 horas e passada em peneira de 0,053 mm com o auxílio de jato de água destilada até remoção total da argila. O material particulado retido na peneira, que consiste no carbono orgânico particulado (COP) associado à fração areia, foi transferido para potes de alumínio, com auxílio de jatos de água, e seco em estufa de circulação forçada a 60°C. Após a secagem, o material foi pesado e determinou-se assim a massa da fração particulada.

Em seguida, moído em gral de porcelana e analisado em relação ao teor de carbono orgânico, conforme descrito para o COT. O material que passou pela peneira de 0,053 mm, consiste no carbono orgânico associado aos minerais (COAM) das frações silte e argila.

Por último, o COAM foi determinado através da diferença entre o COT e COP.

$$\text{COAM} = \text{COT} - \text{COP} \quad (7)$$

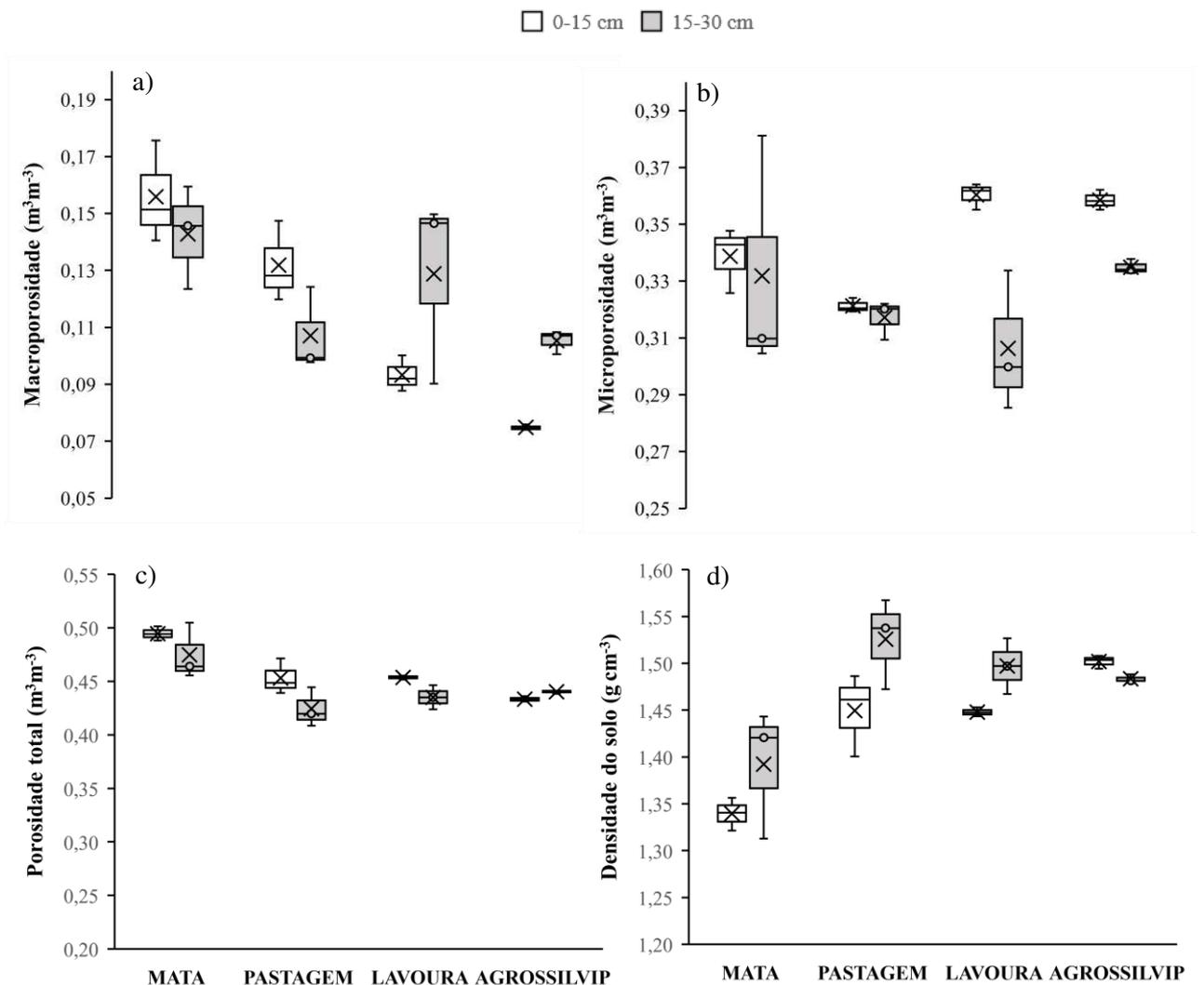
4.5 Análise Estatística

Na análise exploratória dos dados foram calculadas as medidas de posição (mínimo, máximo, média, mediana), medida de dispersão (variância e erro padrão). Os dados obtidos foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade (Barlett), a 5% de significância, quando atendidos esses pressupostos, foi elaborado do gráfico *Boxplot*. Como análise complementar foram aplicados métodos multivariados através da análise de componentes principais, ambas realizadas com base na distância euclidiana e análise de agrupamento não hierárquica pelo método de Tocher. Para todas as análises estatísticas empregou-se o pacote estatístico R versão 3.2.5 (R Core Team, 2016).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os *boxplots* gerados para os atributos físicos do solo indicaram que não houve presença de valores discrepantes (Figura 5). De forma geral, verificou-se valores próximos entre a média e mediana, o que indica baixa variação dos dados. A menor amplitude dos dados foi observada no sistema agrossilvipastoril.

Figura 5. Boxplot dos atributos físicos do solo (macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo) diferentes usos da terra e profundidades em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico no município de Pindaré-Mirim, MA



Na figura 5a, inferiu-se que a macroporosidade foi superior na mata (MT) em ambas camadas ($0,16\ m^3m^{-3}$ e $0,14\ m^3m^{-3}$ para 0-15 cm e 15-30 cm, respectivamente), diferindo das menores médias encontradas no solo sob sistema agrossilvipastoril (SASP) nas duas camadas avaliadas ($0,07\ m^3m^{-3}$ e $0,11\ m^3m^{-3}$) e da lavoura 0-15 cm ($0,09\ m^3m^{-3}$). A redução da macroporosidade nos solos cultivados decorre do aumento da compactação do solo, devido ao impacto do pisoteio animal, tráfego intensivo de máquinas e utilização de implementos

agrícolas (JÚNNYOR et al., 2019, ESTEBAN et al., 2019) que é evidenciada pelo aumento da densidade solo (FREITAS, 2011).

A microporosidade (Figura 5b) na camada 0-15 cm na lavoura ($0,36 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) e sistema agrossilvipastoril ($0,36 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) apresentou maiores valores, enquanto que o menor valor foi observado na pastagem ($0,13 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$). Na profundidade 15-30 cm, o sistema agrossilvipastoril teve valor maior que na pastagem. A microporosidade tem função importante na retenção e armazenamento de água no solo, no entanto, seu aumento em decorrência da diminuição da macroporosidade pode resultar na dinâmica de infiltração de água no solo, oxigenação e desenvolvimento radicular das plantas (REICHERT et al., 2007; BAQUEIRO et al., 2012)

Embora Lavoura e ILPF tenham apresentados valores de M_a estatisticamente menores em relação a mata, não estão dentro dos valores considerados críticos para esse indicador de qualidade do solo. De acordo com Reynolds et al. (2007; 2009), o valor ótimo de macroporosidade deve ser $\geq 0,07 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

Na porosidade total (Figura 5c) constatou-se valores superiores em ambas camadas da mata, diferindo das médias das demais áreas, cujo os valores variaram de $0,49 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e $0,47 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$). Os menores valores de P_t foram na pastagem e sistema agrossilvipastoril.

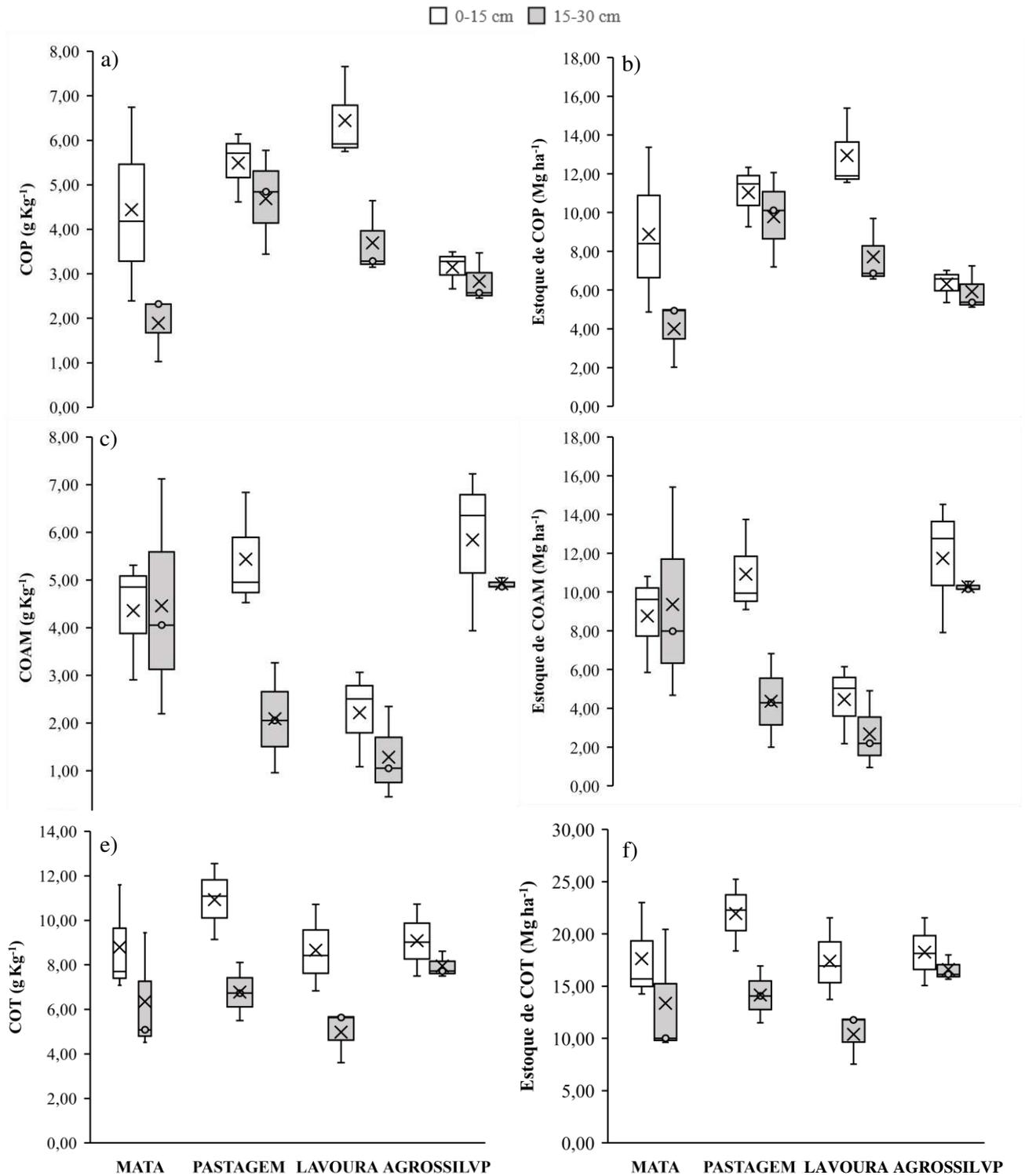
Na Figura 5d, a densidade do solo revelou menores valor na mata em ambas as profundidades, com valores de $1,34 \text{ g cm}^3$ e $1,39 \text{ g cm}^3$, diferindo dos demais usos. Na profundidade 0-15 cm, agrossilvipastoril ($1,50 \text{ g cm}^3$) foi significativamente maior que pastagem ($1,45 \text{ g cm}^3$). O solo da área de mata, devido a maior deposição de matéria orgânica na superfície do solo, formando a serapilheira, somado a ausência de perturbação antrópica, resultou nos menores valores de D_S (PEZZONI et al., 2012).

A porosidade total (P_t) se comportou de maneira semelhante que os valores da macroporosidade do solo e inversamente proporcional à D_S , sendo influenciada significativamente pelos diferentes usos do solo, nas duas profundidades. A maior porosidade e menor densidade na Mata pode estar associado aos elevados teores de carbono orgânico, e de intensa atividade biológica (fauna e raízes), que constrói canais, cavidades e galerias (ROCHA et al., 2015; STEINBEISS et al., 2009), e conseqüentemente promovendo aumento na porosidade do solo, já que esses atributos são inversamente proporcionais (REINERT; REICHERT, 2006).

A espécie forrageira do sistema agrossilvipastoril e pastagem convencional é a *U. brizantha* cv. Marandu, espécie que apresenta hábito de crescimento cespitoso, o que pode favorecer a compactação do solo nas áreas entre touceiras, pelo pisoteio animal. Marchão et al.

(2007), observaram aumento de densidade no perfil do solo em pastagens, principalmente quando utilizaram forrageiras com hábito de crescimento cespitoso.

Figura 6. Boxplot das frações físicas e estoques de carbono em diferentes usos da terra e profundidades em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico no município de Pindaré-Mirim, MA.



Na figura 6a, inferiu-se que o carbono orgânico particulado foi estatisticamente menor no sistema agrossilvipastoril na profundidade de 0-15 cm, em comparação a pastagem e lavoura. Na profundidade 15-30, a mata diferenciou com o menor valor. O Estoque de COP (Figura 2b), seguiu a mesma tendência, na profundidade 0-15 cm, atingiu 13 Mg ha⁻¹ na lavoura, em contrapartida, com menor estoque, o sistema agrossilvipastoril com 6 Mg ha⁻¹. A mata obteve o menor estoque de COP na profundidade 15-30 cm.

As figuras 6c e 6d revelaram maiores valores de COAM e Estoque de COAM para o sistema agrossilvipastoril na profundidade 0-15 cm, diferenciando a lavoura. Já na profundidade 15-30 cm, os maiores valores foram observados no sistema agrossilvipastoril, diferenciando da pastagem e lavoura. Esse comportamento foi observado por Loss et al, 2014, quando comparou frações granulométricas e oxidáveis da matéria orgânica sob diferentes usos do solo no Paraná, cujo sistema de preparo convencional apresentou os menores valores de COAM, justificado pelo uso de práticas como aração e gradagem, que quebram os agregados do solo, expondo a matéria orgânica anteriormente protegida no interior dos macroagregados, à oxidação e ação microbiana, reduzindo seu teor no solo (CALONEGO et al., 2012).

É possível observar uma correlação negativa entre COP e COAM, indicando que os processos de formação dessas frações são opostos. Ou seja, para que se tenham maiores teores de COAM no solo é necessário que ocorra maior decomposição (diminuição) dos teores de COP para posterior associação com os minerais de silte e argila do solo (LOSS et al., 2014). Este padrão pode ser observado neste trabalho, pois as áreas de sistema agrossilvipastoril e Mata apresentaram os menores teores de COP e conseqüentemente, os maiores de COAM (Tabela 2), indicando que parte do COP foi decomposto e passou a fazer parte do COAM.

A fração COT e Estoque de COT (Figuras 6e e 6f), não sofreram influência do manejo na profundidade 0-15cm. Na profundidade 15-30 cm, a lavoura foi estatisticamente menor em relação ao sistema agrossilvipastoril. Esse resultado é devido ao manejo empregado na área, como o revolvimento mecânico do solo que expôs a matéria orgânica, gravado ainda, pelas altos índices pluviométricos e altas temperaturas da região amazônica maranhense que aceleram a decomposição da matéria orgânica (MOURA et al., 2018).

Em todas as profundidades, houve decréscimo em média de 40% nos teores de carbono para todas as frações analisadas. Esse comportamento pode ser explicado devido a camada superficial do solo ser a região onde há maior deposição de serapilheira (SALTON et al., 2011).

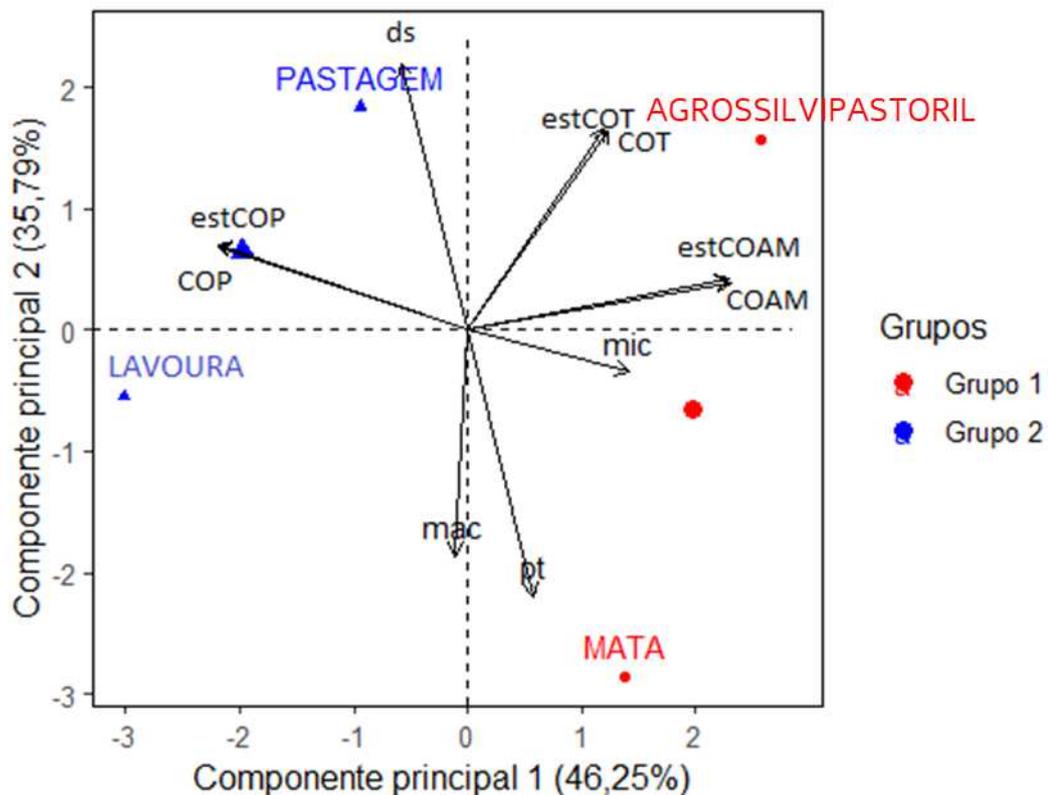
Na Tabela 2 estão apresentadas as porcentagens da variância explicada pelos componentes principais 1, 2 e 3. Os componentes 1, 2 e 3 explicam, respectivamente, 46,25, 35,79 e 17,97% da variância total dos atributos estudados e somados os componentes 1 e 2 alcançam 82,03% da variação dos dados. De acordo com os autovalores, no primeiro componente principal, destacaram-se MIC, PT, os teores de COAM e estCOAM. No segundo componente principal ficou evidente a relação entre COT, COP e estCOP. No terceiro componente principal, destacou-se a MAC.

Tabela 2. Análise dos autovalores, porcentagem da variância total e variância acumulada explicadas pelos componentes principais dos atributos do solo, em diferentes usos da terra em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico no município de Pindaré Mirim, MA.

Atributos	CP1	CP2	CP3
MAC	-0,047	-0,788	0,614
MIC	0,6	-0,145	-0,787
PT	0,247	-0,928	0,278
DS	-0,247	0,929	-0,276
COT	0,507	0,703	0,499
COP	-0,927	0,293	0,233
COAM	0,972	0,179	0,149
estCOT	0,523	0,694	0,495
stCOP	-0,924	0,301	0,236
estCOAM	0,975	0,168	0,145
Variância total (%)	46,25	35,79	17,97
Variância acumulada (%)	46,25	82,03	100,00

Ao analisar o agrupamento na figura 7, percebe-se a formação de dois grupos distintos de usos da terra o primeiro é composto pela lavoura e pastagem, que favorecem os teores de COP e estCOP e valores de DS e MAC; o segundo grupo formado pela mata sistema agrossilvipastoril, que possuem estreita relação com os estCOT, estCOAM, COT, COAM e valores de MIC e PT.

Figura 7. Gráfico biplot dos componentes principais (CP1 e CP2) e agrupamento dos atributos físicos e fracionamento de carbono, em diferente usos da terra e profundidades em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico no município de Pindaré Mirim, MA.



O COT e o COAM tiveram maior correlação com no sistema agrossilvipastoril. Esse resultado pode indicar que o sistema radicular das gramíneas forrageiras e a serapilheira do componente florestal, podem ter liberado mais material orgânico, com consequente aumento dessas frações de C (CARMO et al., 2009).

O sistema agrossilvipastoril, que anteriormente era uma pastagem convencional, está se distanciando da pastagem e se aproximando da mata, esse resultado aponta que é possível recuperar áreas degradadas, decorrentes do desmatamento na Amazônia, por meio da introdução de sistemas agrossilvipastorais. Isto se deve ao aumento do teor de matéria orgânica na superfície de área, promovendo melhor agregação do solo (SOUZA et al., 2016). Já a

antropização desfavoreceu os atributos físicos do solo, resultado atrelado as alterações no manejo devido ao emprego de máquinas e equipamentos (SILVA et al., 2016).

6. CONCLUSÃO

Densidade do solo e carbono orgânico associado aos minerais (COAM) são os indicadores de qualidade do solo mais sensíveis às alterações no manejo nos usos da terra.

O sistema agrossilvipastoril proporciona maior estabilidade da matéria orgânica quando comparado aos sistemas convencionais.

É necessário um maior tempo de avaliação para identificar se existe interferência dos sistemas agrossilvipastoris na qualidade física do solo.

REFERÊNCIAS

- ABDI, E; BABAPOUR.S; MAJNOUNIAM, B; AMIRI, G.Z; DELJOU EI, A. How does organic matter affect the physical and mechanical properties of forest soil? **Journal of Forestry Research**, v. 29, n. 3, p. 657- 662, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-017-0494-4>.
- AGUIAR, A. D. C. F.; BICUDO, S. J.; SOBRINHO, J. R. S. C.; MARTINS, A. L. S.; COELHO, K. P.; DE MOURA, E. G. Nutrient recycling and physical indicators of an alley cropping system in a sandy loam soil in the pre-Amazon region of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.86, n. 2, p. 189-198, 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10705-009-9283-6>
- AGUIAR, A.C.F.; SOUZA, E.A.; SILVA, A.J.C.; MOURA, E.G.M. 2014. Enhancement of nitrogen use efficiency to increase yield and maize grain quality in no-till systems. **Tropentag 2014**, Prague, Czech Republic September 17-19.
- AGUIAR, Maria Ivanilda de. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 89f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- ALMEIDA, B. GOMES de. FREITAS, P.L de; TEIXEIRA, W.G. VIANA, J.H.M; DONAGEMMA, G.K. Porosidade. In: **TEIXEIRA, P.C; DONAGEMMA, G.K; FONTANA, A. TEIXEIRA, W.G. Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed rev. e amp. Brasília – DF, Embrapa Solos, 2017.
- AMORIM, Fábio Farias. **Agregação e estabilidade da matéria orgânica em sistemas conservacionistas de manejo do solo**. 2016. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- ASSIS, P. C. R. et al. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 4, p. 309- 316, 2015.
- BAI, Z; CASPARI, T; CONGALEZ, M.R; BATJES, N.H; MÄDE, P; BÜNEMANN; GOEDE, R DE; BRUSSAARD, L; XU, MINGGANG, FERREIRA, C.S.S, REINTAM, E; FAN, H; MIHELÍČ, R; MATJAŽ, R; ZOLTÁN, G; TÓTH Z. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 265, p.1-7, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. STONE, L. F. **Marco referencial: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**. Reference document: crop-livestock-forestry integration. Brasília, DF: Embrapa. p.130. 2011.
- BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.28, p.1261- 1263, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00112-5)
- BAQUERO, J.E.; RALISCH, R.; MEDINA, C.C.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M.F. Soil Physical Properties and Sugarcane root growth in a red oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36, p.63-70, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100007>

BARBOSA, E. A. A.; MATSURA, E. E.; SANTOS, L. N. S.; NAZÁRIO, A. A.; GONÇALVES, I. Z.; FEITOSA, D. R. C. Soil attributes and quality under treated domestic sewage irrigation in sugarcane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 137-142, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p137-142>

BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C. N.; SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society American Journal**, v.65, p.1473–1478, 2001. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551473x>

BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; SAAB, S. da C.; MILORI, D. M. B. P.; BAGNATO, V. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. **Geoderma**, v.105, p.81-92, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00093-3)

BETZEK, N. M.; GODOY, E. S.; LEONES, C. B.; SOBJAK, R.; BIER, V. A.; MERCANTE, E. Interpolation methods for thematic maps of soybean yield and soil chemical attributes. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 2, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n2p1059>

BONAUDO, T.; BENDAHAN, A.B.; SABATIER, R.; RYSCHAWY, J.; BELLON, S.; LEGER, F.; MAGDA, D.; TICHIT, M. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. **European Journal of Agronomy**, v.57, p.43-51, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>

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, p.104–112, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.06.008>

BONGIORNO, G; BÜNEMANN, E.K; OGUEJIOFOR, C.U; MEIER, J; GORT, G; COMANS, R; Mäder, P; BRUSSAARD, L; GOEDE, RON de. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators**, v. 99, p.38-50, abr. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008>.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. 2, p.105-125, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

BUYANOVSKY, G. A.; ASLAM, M.; WAGNER, G. H. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Science Society of American Journal*, v.58, p.1167-1173, 1994. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800040023x>

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

CAMARGO, Flora Ferreira. **Indicadores físicos, químicos e biológicos da qualidade do solo em sistemas agroflorestais agroecológicos na área de preservação ambiental**. 2016. 241 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2016.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.777-783, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.

CÂNDIDO, G. A.; NÓBREGA, M. M.; FIGUEIREDO, M. T. M.; SOUTO MAIOR, M. M. Avaliação da sustentabilidade de unidades de produção agroecológicas: um estudo comparativo dos métodos IDEAS e MESMIS. **Ambiente & Sociedade**, v. 18, n. 3, p. 99-120, 2015. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC756V1832015>

CARDOSO, José Alberto Ferreira. **Atributos químicos e físicos do solo e matéria orgânica do solo sob mangueira Irrigada e caatinga nativa na região do Vale do Submédio São Francisco**. 2014. 77f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, Juazeiro – BA.

CARMO, F.F; FIGUEIREDO, C.C; RAMOS, M.L.G; VIVALDI, L.J; ARAÚJO, L.G. Frações granulométricas da matéria orgânica em latossolo sob plantio direto com gramíneas. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 420-431, 2012

CARMO, M. C.; CUNICO, J. M.; SANTOS, M. R. G.; SILVA, P. K. M.; SIQUEIRA, M. G. Densidade e porosidade do solo em pastagem recuperada e degradada, na Amazônia Ocidental. **Agrarian Academy**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.5, n.9; p. 2018.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELO, C. R. de; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 34, n. 2, p. 277-290, 2010.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Adv Soil Science**. 20:1-9. 1992.

CONCEIÇÃO, M. C. G. DA; MATOS, E. DA S.; BIDONE, E. D.; RODRIGUES, R. DE A. R.; CORDEIRO, R. C. Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. **Agricultural Sciences**, 8, 904-913, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4236/as.2017.89066>

CORDEIRO, L.A.M; VILELA, L; MARCHÃO, R.L; KLUTHCOUSKI, MARTHA JÚNIOR, G.B. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 15-53, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23294>

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. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_514_530

COSTA, T. G. A.; IWATA, B. F.; COELHO, J. V.; ROCHA, I. L.; SANTOS, J. G. P.; LEOPOLDO, N. C. M.; ALVES, M. F.; MACIEL, A. C. R.; CLEMENTINO, G. E. S. **Atributos de qualidade do solo sob fitofisionomias de cerrado sensu stricto e cerradão no Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba**. v.5, n.10, p. 625-642. 2018. DOI: <https://doi.org/10.21438/rbgas.051016>

DANIELLS, I.G. Hardsetting soils: a review. **Soil Research**, v. 50, n. 5, p. 349-359, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1071/SR11102>

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. **Defining and assessing soil quality**. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, v.35, n.1, p.3-21, 1994.

ESTEBAN, D. A. A; DE SOUZA, Z. M; TORMENA, C. A; LOVERA, L. H; SOUZA LIMA, E; OLIVEIRA, I. N; PAULA RIBEIRO, N. (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, 187, 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.015>

FACCIN, F.C; MARCHETTI, M.E; SERRA, A.P; ENSINAS, S.C. Frações granulométricas da matéria orgânica do solo em consórcio de milho safrinha com capim-marandu sob fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 12, p. 2000-2009, 2017. DOI: <https://doi.org/1590/s0100-204x2016001200011>

FERREIRA, Cláudia dos Reis. **Indicadores da qualidade do solo em uma cronosequência sob sistema plantio direto em Guaíra – PR**. 2016. 91 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica – RJ, 2016.

FERREIRA, D. F.; FILHO, A. C.; LUCIO, A. D. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrição na casualização. **Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.3, p.16-19, 2012.

FIDALSKI J. Qualidade física de Latossolo Vermelho em sistema de integração lavoura-pecuária após cultivo de soja e pastejo em braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 50. P. 1097-1104, 2015. DOI: <10.1590/S0100204X2015001100013>

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A; ALVES, S. J.; AULER, P. A. M. Influence of sand fractions on water retention and availability in Caiuá and Paranaíba sandstone formations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n.3, p. 613-621, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000300007>

FRANZLUEBBERS, A.J.; SAWCHIK, J.; TABOADA, M.A. Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.190, p.18-26, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.017>

FREITAS, C.D. **Qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo na região central de Minas Gerais**. (Dissertação). Universidade Federal de Viçosa – Florestal, MG, 2017.

GARCIA, Uelson Serra. **Avaliação dos atributos físicos, químicos e estoque de carbono do solo em diferentes ambientes em matas de babaçu, no Estado do Maranhão**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2015.

GEHRING, C.; MOURA, E. G.; SANTOS, R. R. S.; AGUIAR, A.C.F.; SOUSA, A. M. B.; BODDEY, R.M. Ecological intensification of rice production in the lowlands of Amazonia- options for smallholder rice producers. **European Journal of Agronomy**. v. 46, p. 25-33, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.11.006>

GOUEL, C.; GUIMBARD, H. Nutrition Transition and Structure of Global Demand, Washington, DC: **International Food Policy Research Institute**, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajae/aay030>

GOMES, R.P; CAMPOS, M.C.C; SOARES, M.D.R; SILVA, D.M.P; CUNHA, J.M; FRANCISON, U; SILVA, L.S; OLIVEIRA, I.A; BRITO, W.B.M. Spatial variability of aggregates and organic carbon under three different uses of indian black earth in Southern Amazonas. **Bioscience Journal**, v. 33, n. 6, p. 1513-1522, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v33n6a2017-37142>

GUIMARÃES, N. F.; GALLO, A. S.; SANTOS, C. C.; MORINIGO, K. P. G.; BENTOS, A. B.; CARVALHO, E. M. Avaliação da sustentabilidade de um agroecossistema pelo método MESMIS. **Scientia Plena**, v. 11, n. 5, p. 1-11, 2015.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Série Histórica 2001-2020 de Dados Mensais da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Convencional de Zé Doca**. 2021 Disponível em: http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/mapas_mensal_sem.php. Acesso em 01 ago. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. Rio de Janeiro: IBGE- Diretoria de Geociências, 2012. 271 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites—sistemas Prodes, Deter, Degrad e Queimadas**. São José dos Campos: INPE. 2016.

JOHNSON, J.A, RUNGE, CF, SENAWER, B; POLASKY, S. Global food demand and Carbon-Preserving Cropland Expansion under Varying Levels of Intensification. **Land Economics**, vol. 92, n. 04, pp. 579 - 592, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3368/le.92.4.579>

JÚNNYOR, W. D. S. G; MARIA, I. C. D; ARAUJO JUNIOR, C. F; LIMA, C. C. D., VITTI, A. C; FIGUEIREDO, G. C; DECHEN, S. C. F. Soil compaction on traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. **Scientia Agricola**, 76(6), 509-517, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0052>

KANNAN, P; PONMANI, S; PRABUKUMAR, G; SWAMINATHAN, C. Effects of crop residue mulch and seedbed preparation methods on soil properties and rainfed groundnut production in Alfisols of semi-arid Índia. **Soil Use Management**, p. 479-493, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12622>

KAY, B. D. Soil Structure and Organic Carbon: A review. In: **Soil processes and the carbon cycle**. CRC press, 2018. p. 169-197. DOI: [10.1201/9780203739273-13](https://doi.org/10.1201/9780203739273-13)

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

KÖPPEN, W. **Climatologia**. Mexico: Fundo de Cultura Econômica, 1948. 466 p.

KOVEN, C. D.; HUGELIUS, G.; LAWRENCE, D. M.; WIEDER, W. R. Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 11, p. 817-822, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate3421>

KUNDE, R.J; LIMA, C.L.R; DOS ANJOS SILVA, S.D; PILLON, C.N. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1520-1528, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900051>

KUNDE, R.J; LIMA. C.L.R de; SILVA, S.D. DOS ANJOS; PILLON, C.N. Physical fractions of organic matter in an Oxisol cultivated with sugarcane in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 2016, v. 51, n. 9. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900051>

LADHA, J.K.; REDDY, C. K.; PADRE, A.T.; VAN KESSEL, C. Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils. **Journal of Environmental Quality**, v. 40, p. 1756–1766, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0064>

LAPIG - Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento. Atlas Digital das Pastagens Brasileiras. UFG, 2019. Disponível em: <https://pastagem.org/map>. Acesso em: 16 ago. 2021.

LEAL, O.D.A.; CASTILHOS, R.M.V.; PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; LEMES, E.S.; KUNDE, R.J. Initial Recovery of Organic Matter of a Grass-Covered Constructed Soil after Coal Mining. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 1, p. 1-16, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150384>

LEITE, M.F.A.; LUZ, R.L.; MUCHAVISOY, K.W.M.; ZELARAYAN, M.L.C.; CARDOSO, E.G; MORAES, F.H.M.; ROUSSEAU, G.X.; GEHRING, C. The effect of land use on aboveground biomass and soil quality indicators in spontaneous forests and agroforests of eastern Amazonia. **Agroforestry System**, v. 90, p.1009–1023, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9880-0>

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P.C. de F.; DEDIEU, B. Integrated crop-livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.190, p.4-8, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1233-1244, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600002>

LOSS, A; PEREIRA, M.G; COSTA, E.M; BEUTLER, S.J. Frações granulométricas e oxidáveis de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso do solo, no Paraná, Brasil. **Bioscience Journal**. v. 30, n.1, p. 43-54, 2014. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/15041>

LOVELL, S.T.; DUPRAZ, C.; GOLD, M.; JOSE, S.; REVORD, R.; STANEK, E.; WOLZ, K.J. Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polycultures and the

design of long-term field trials. **Agroforestry systems**, v. 92, n. 5, p. 1397-1415, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-017-0087-4>

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 133-146, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300015>

MAGALHÃES, S. S. A.; RAMOS, F. T.; WEBER, O. L. S. Carbon stocks of an Oxisol after thirty-eight years under different tillage systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 85-91, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p85-91>

MALÉZIEUX, E. Designing cropping systems from nature. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 1, p. 15-29, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13593-011-0027-z>

MARQUES, J. D. D. O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; SARRAZIN, M.; FERREIRA, S. J. F.; BELDINI, T. P.; MARQUES, E. M. D. A. Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 232-242, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20150142>

MAUSEL, P. W. Soil quality in Illinois - an example of a soils geography resource analysis. **The Professional Geographer**, v.23, n.1, p.127-136, 1971. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1971.00127.x>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Uso e Cobertura da Terra na Floresta Amazônica**. Relatório PROBIO v. 2, 2018. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biomas/amazonia>. Acesso em: 16 ago. 2021.

MITTON, R.V.; COBOS, J.Y.G.; BARBOSA, L.R.; BORGIO, J.D.H. Physical fractionation of organic matter of a typical dystrophic red latosol by the sound method. **Revista Scientia Agraria**. Curitiba, v. 18, n. 2 p. 22-29, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v18i2.49314>.

MONI, C.; DERRIEN, D.; HATTON, P. J.; ZELLER, B.; KLEBER, M. Density fractions versus size separates: does physical fractionation isolate functional soil compartments. *Biogeosci. Disc.* 2012. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-9-5181-2012>.

MORAIS, T.P.S.; PISSARRA, T.C.T.; REIS, F.C. Atributos físicos e matéria orgânica de um Argissolo Vermelho-Amarelo em microbacia hidrográfica sob vegetação nativa, pastagem e cana-de-açúcar. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v.8, n.15, p.214-223, 2012. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3593>

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, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/su10041006>

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 Agrícola**, v.65, p. 204-208, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000200014>

MOURA, E.G.; GEHRING, C.; BRAUN, H.; FERRAZ JUNIOR, A.S.L.; REIS, F.O.; AGUIAR, A.C.F. Improving farming practices for sustainable soil use in the humid tropics and rainforest ecosystem health. **Sustainability**, v.8, p. 841, 2016b. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8090841>

MOURA, E.G.; SENA, V.G.L.; CORREA, M.S.; AGUIAR, A.F.C. The Importance of an Alternative for Sustainability of Agriculture around the Periphery of the Amazon Rainforest. **Recent patent on food, nutrition & agriculture**, v. 5, n. 1, p. 70-78, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.2174/2212798411305010011>

MOURA, E.G.; SERPA, S. S.; SANTOS, J. G. D.; COSTA SOBRINHO, J.R.; AGUIAR, A.C.F. Nutrient use efficiency in alley cropping systems in the Amazonian periphery. **Plant and Soil**, v.335, p.363– 371, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0424-0>

MUSCOLO, A.; SIDARI, M.; NARDI, S.; Humic substance: Relationship between structure and activity. Deeper information suggests univocal findings. **Journal of Geochemical Exploration**, n.129, p. 57-63, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.012>

MOUSSADEK, R.; MRABET, R.; DAHAN, R.; ZOUAHRI, A.; EL MOURID, M.; VAN RANST, E. Tillage system affects soil organic carbon storage and quality in central Morocco. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2014, p.1-8. DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/2014/654-796>

OLIVEIRA, W. R. D. D.; RAMOS, M. L. G.; CARVALHO, A. M. D.; COSER, T. R.; SILVA, A. M. M.; LACERDA, M. M.; PULROLNIK, K. Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1501-1510, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900049>

PEZZONI, T.; VITORINO, A.C.T.; DANIEL, O.; LEMPP, B. Influência de *Pterodon emarginatus* Vogel sobre atributos físicos e químicos do solo e valor nutritivo de *Brachiaria decumbens* Stapf em sistema silvipastoril. **Cerne**, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602012000200014>

PILATTI, Maurício Antônio. **Atributos físicos de um Latossolo argiloso sob sistemas de manejo do solo**. 59f. (2018). (Dissertação) Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel – PR, 2018.

PREVEDELLO, Juliana. **Dinâmica do armazenamento e da disponibilidade de água em argissolo sob eucalipto e campo nativo**. 2013. 120f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.

QUESADA, C. A., PAZ, C., OBLITAS, E. M., PHILLIPS, O. L., SAIZ, G., LLOYD, J. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. **Soil**, 6, 53–88, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>

RAMOS, F. T; DORES, E. F. G. C; WEBER, O. L. S; BEBER, D. C; CAMPELO JR, J. H; MAIA, J. C. S. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8881>

REICHERT, J. M.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F.; SUZUKI, L. E. A. S. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandzation/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 233, p. 370-380, 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.039>

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, p.1403-1412, 2016b. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/ldr.2395>

REICHERT, J.M; REINERT, D.J; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciências Ambientais.**, 27:29-48, 2003.

REINERT, D.J; REICHERT, J.M. **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria: Departamento de Solos, UFSM. 18 p, 2006.

REES, H. V; MCCLELLAND, T.; HOCHMAN, Z.; CARBERRY, P.; HUNT, J.; HUTH, N.; HOLZWORTH, D. Leading farmers in South East Australia have closed the exploitable wheat yield gap: prospects for further improvement. **Field Crops Research**, v. 164, p. 1-11, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.018>.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; FOX, C.A.; TAN, C.S.; ZHANG, T.Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, v. 96, p. 316–330, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.07.003>

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, 110, p.131-146, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)

ROSA, M.E.C; OLSZEWSKI, N; MENDONÇA, E.S; COSTA, L.M; CORREIA, J.R. Formas de carbono em Latossolo Vermelho Eutroférrico sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 911-923, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500016>

SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; MIRANDA, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. **Colloquium Agrariae**, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2018.

SALTON, J. C; MIELNICZUK, J; BAYER, C; FABRÍCIO, A. C; MACEDO, M. C. M; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, out. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000031>

SANTOS, R. D. LEMOS, R.C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 6. ed. Viçosa-MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 17,18. 2013.

SENA, Virley Gardeny Lima. **Sequestro de carbono e eficiência do uso de nutrientes pelo milho em plantio direto sobre palha de leguminosas arbóreas**. 132f. 2019. (Tese) Doutorado. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu – SP, 2019.

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

SILVA, Juslei Figueiredo da. **Física do solo e matéria orgânica em sistema de produção agrícola de cerrado**. 2020. 105 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2020.

SILVA, L.S. et al. Heavy metal contents in Latosols cultivated with vegetable crops. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.46, p.391–400, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4641587>

SILVA, M. de OLIVEIRA; VELOSO, C.L; NASCIMENTO, D.L do. OLIVEIRA, J. de; PEREIRA, D. de FREITAS; COSTA, K.D. da SILVA. Chemical and physical indicators of soil quality. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>

SMITH, P. Malthus is still wrong: we can feed a world of 9-10 billion, but only by reducing food demand. **Proceedings of the Nutrition Society**, v.74, p.187-190, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0029665114001517>

SOLLENBERGER, L. E.; MOORE, J. E.; ALLEN, V. G.; PEDREIRA, C.G.S. Reporting forage allowance in grazing experiments. **Crop Science**, v.45, n.3, p.896-900. 2005. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0216>

SOUZA, E. D.; SILVA, F. D.; PACHECO, L. P.; LAROCA, J. S. V.; SOUZA, J. M. A.; BONETTI, J. A. Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. In: **SOUZA E. D.; SILVA F. D; ASSMANN T. S.; CARNEIRO M. C. C.; CARVALHO, P. C. F.; PAULINO, H. P. Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil**. 1 ed. Copiart, p. 107-122, 2018.

SOUZA, E.D de.; CARNEIRO, M.A.C; PAULINO, H.B; RIBEIRO, D.O; BAYER, C; ROTTA, L.A. Matéria orgânica e agregação do solo após conversão de “campos de murundus” em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.51, n.9, p.1194-1202, set. 2016 DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900019>

SPERA, S.T; SANTOS, H.P dos; TOMM, G,O; KOCHHANN, R.A; ÁVILA, A. Atributos físicos do solo em sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Solos e Nutrição de Plantas**. Bragantia, v. 68, n. 4, p. 1079-1093, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000400029>

STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 6, p. 1301-1310, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.03.016>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de anaimétodos 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 de. P; MARRA, L.M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**. Maringá, v. 13, n.4, p. 1447-1469, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n4p1447-1469>

VALLE, S. R.; CARRASCO, J. Soil quality indicator selection in Chilean volcanic soils formed under temperate and humid conditions. **Catena**, 2018. v. 162, p. 386–395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.024>

VOLK, L.B. da SILVA; TRINDADE, J.P.P. **Princípios técnicos de manejo de sistemas pecuários para maior disponibilidade de água no solo**. Comunicado Técnico 104. Bagé – RS, 2020.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p.1467-1476, 1988. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/00103628809368027>