



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE BALSAS - CESBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA**

VICTOR ROBERTO RIBEIRO REIS

**VARIAÇÃO NOS ATRIBUTOS DO SOLO EM AGROSSISTEMAS DA AMAZÔNIA
MARANHENSE E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO**

Balsas - MA
2021

VICTOR ROBERTO RIBEIRO REIS
Engenheiro Agrônomo e Gestor Ambiental

**VARIAÇÃO NOS ATRIBUTOS DO SOLO EM AGROSSISTEMAS DA AMAZÔNIA
MARANHENSE E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura
Co-orientador: Prof. Dr. Luciano Cavalcante Muniz

Balsas-MA
2021

Reis, Victor Roberto Ribeiro.

Varição nos atributos do solo em agrossistemas da Amazônia maranhense e suas relações com a produtividade do milho / Victor Roberto Ribeiro Reis. – Balsas, MA, 2021.

82 f

Dissertação (Mestrado) – Curso de Agricultura e Ambiente, Centro de Estudos Superiores de Balsas, Universidade Estadual do Maranhão, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura.

1.Fertilidade do solo. 2.Solos frágeis. 3.Variabilidade espacial. I.Título.

CDU: 633.15-145(812.1)

VICTOR ROBERTO RIBEIRO REIS
Engenheiro Agrônomo e Gestor Ambiental

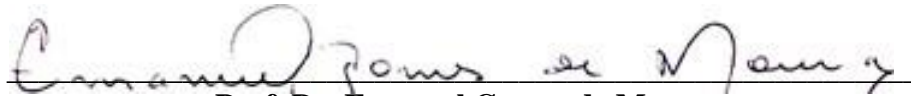
**VARIAÇÃO NOS ATRIBUTOS DO SOLO EM AGROSSISTEMAS DA AMAZÔNIA
MARANHENSE E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura
Co-orientador: Prof. Dr. Luciano Cavalcante Muniz

Aprovado em: ____/____/____

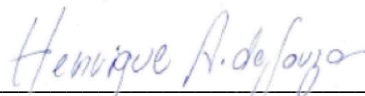
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura
Orientador – UEMA



Prof. Dr. Mario Andrade Lira Junior
Examinador externo – UFRPE



Dr. Henrique Antunes de Souza
Examinador externo – EMBRAPA MEIO NORTE

Aos meus pais, Marijones Costa Ribeiro e José Roberto Silveira Reis, mestres da minha vida.

Ao meu amigo, Luciano Muniz, pelas oportunidades e por sempre acreditar no meu potencial!

DEDICO

“Gente que não tem dúvida só é capaz de se repetir”.

Mario Sergio Cortella

“E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria”.

1 Coríntios 13:2.

AGRADECIMENTOS

Ao meu grande Deus, por toda honra e glória sobre a minha vida!

À minha família por ter acreditado nos meus planos e me fortalecido sempre que precisei, mesmo quando não entendiam os motivos das minhas escolhas. À minha mãe, Marijones Costa Ribeiro, o seu amor, carinho e dedicação é a minha inspiração de vida. Roberto Reis, o seu exemplo de pai sempre dedicado, serve de modelo para que eu seja um homem digno e mais humano.

Ao meu orientador, professor Emanuel Gomes de Moura, por quem tenho grande respeito e admiração, e que sempre que possível me presenteou com toda sua sabedoria e experiência, que sem dúvidas foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao professor Luciano Cavalcante Muniz, que sempre foi um ótimo conselheiro, e além disso, um ser humano humilde e generoso, que não se opõe em ajudar as pessoas, me proporcionando momentos únicos de grande enriquecimento pessoal e profissional, sou grato pela sua amizade e da sua família por toda eternidade.

Aos professores Valéria Xavier de Oliveira Apolinário e Joaquim Bezerra Costa que fizeram tudo o que estava ao seu alcance para me garantir a segurança e autoconfiança tão necessárias para um jovem profissional.

Ao GINTEGRA, por toda honra e privilégio de fazer parte de um grupo de pesquisa diferenciado, que acredita no potencial do seus integrantes. Obrigado de coração, a cada um, por tanto esforço, dedicação, empenho e suporte para que fosse possível a concretização desta pesquisa.

A toda turma do PPGAA, cheia de sotaques, que batizamos de AMATOPI (Amapá, Maranhão, Tocantins e Piauí) pela amizade e momentos compartilhados, em especial, a Maria Karoline Rodrigues, Raabe Alves, Luara Aragão e Valéria Melo com quem compartilhei diariamente a estadia em Balsas e estávamos juntos nos momentos de sufoco e relaxamento.

A Débora Sampaio por sempre me acompanhar e ser essa pessoa companheira e carinhosa.

Aos funcionários do laboratório de Solos: Neto, Nilson, Jade e Sr. Cesário, pelo suporte na rotina. Aos técnicos de laboratório, João Reis e Josael, pelo apoio, disponibilidade e auxílio nas análises.

Aos funcionários da Fazenda Muniz, Sr. Ronaldo e Dona Neide que nos deram muita ajuda nas avaliações em campo.

À UEMA, FAPEMA, EMBRAPA e IFMA pela realização deste Curso e concessão da bolsa e apoio financeiro para realização desta pesquisa.

À Biomatrix Sementes pela doação das sementes utilizadas neste experimento.

Ao programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA.

A todos que direta ou indiretamente incentivaram-me, acreditando que eu seria capaz de concluir mais uma importante etapa profissional.

RESUMO

Na Amazônia maranhense, nós defendemos que a intensificação sustentável da agropecuária é perfeitamente aplicável e urgentemente necessária. O objetivo desse estudo foi determinar a variação nos atributos do solo em agrossistemas da Amazônia maranhense e suas relações com a produtividade do milho, visando definir as práticas de manejo capazes de aumentar o potencial de produção de milho, em solos estruturalmente frágeis da Amazônia maranhense. O experimento foi conduzido entre novembro/2019 e maio/2020, no município de Pindaré-Mirim, MA, Brasil. Este estudo foi dividido em dois ensaios experimentais: Ensaio 1: Avaliação dos atributos do solo que influenciam a produtividade do milho em solos frágeis. Para essa avaliação foram delimitados 119 pontos de amostragem georreferenciados, em uma grade uniforme de 9 m x 8 m, totalizando uma área experimental de 1 ha. A produção de milho foi amostrada em 6 m², ao redor dos pontos de amostragens. Para determinação dos atributos físicos, foi aberta uma trincheira de 30 x 30 x 30 cm, próxima a cada ponto de amostragem. Ensaio 2: Avaliou-se a fertilidade do solo em diferentes agrossistemas, cada um com aproximadamente 1 ha: (i) Mata secundária, (ii) *Urochloa brizantha* cv. Marandu, (iii) Lavoura de milho e (iv) Sistema Agrossilvipastoril. Para essa avaliação foram abertas três trincheiras semelhantes àquelas do experimento anterior, em cada agrossistema, distribuídas de forma aleatória. Para retirada das amostras deformadas, foram coletados, ao redor de cada trincheira, doze pontos equidistantes nas quatro direções cardeais. Em ambos os experimentos, foram coletadas amostras em duas camadas: 0-15 e 15-30cm, analisando-se os atributos físicos (composição granulométrica, Ds, PT, MIC e MAC e RP), os atributos químicos (pH, P, Ca, Mg, K, Na, H+Al, T, CTC e V%) e as frações físicas de carbono orgânico (COT, COP e COAM). No segundo experimento, não foi analisada a RP, composição granulométrica e o complexo sortivo do solo. No experimento 1 foram realizadas a estatística descritiva dos dados, o teste de normalidade de Shapiro-Wilk e de homogeneidade de variância de Bartlett, o teste de correlação de Pearson e a regressão múltipla pelo método stepwise, ambos a 5% de significância, além da Krigagem Ordinária com mapas de isolinhas. No experimento 2 foram realizados os testes de normalidade e homogeneidade de variância, com posterior análise de comparação de médias pelo teste de Tukey, ambos a 5% de significância. Os atributos do solo que influenciaram a produtividade do milho foram COAM, RP e pH e indiretamente os teores de Ca. Em solos tropicais frágeis, o sistema agrossilvipastoril representou uma ótima estratégia para conservação e recuperação ambiental.

Palavras chave: Fertilidade do solo, Solos frágeis, Variabilidade espacial.

ABSTRACT

In the Amazon region of Maranhão, we defend that the sustainable intensification of agriculture is perfectly applicable and urgently needed. The objective of this study was to determine the variation in soil attributes in agrosystems in the Amazon region of Maranhão and its relationships with corn productivity, aiming to define management practices capable of increasing the potential for corn production in structurally fragile soils in the Amazon region of Maranhão. The experiment was conducted between November/2019 and May/2020, in the city of Pindaré-Mirim, MA, Brazil. This study was divided into two experimental tests: Experiment 1 - Determined which and how soil attributes influence corn productivity in fragile soils. For this evaluation, 119 georeferenced sampling points were delimited, in a uniform grid of 9m x 8m, totaling an experimental area of 1 ha. Corn production was sampled in 6m² around the sampling points. To determine the physical attributes, a 30x30x30cm trench was opened, close to each sampling point. Experiment 2-Compared soil fertility in different agrosystems. Four agrosystems, each with approximately 1 ha, were evaluated: Secondary forest, *Urochloa brizantha* cv. Marandu, Corn Crop and Agrosilvipastoral System. For this evaluation, three trenches similar to those of the previous experiment were opened in each agrosystem, distributed at random. To remove the deformed samples, twelve points equidistant in the four cardinal directions were collected around each trench. In both experiments, two layers were collected: 0-15 and 15-30cm. Physical attributes (particle size composition, Ds, PT, MIC and MAC and RP), chemical attributes (pH, P, Ca, Mg, K, Na, H+Al, T, CTC and V%) and fractions were analyzed of organic carbon (COT, COP and COAM). In the second experiment, the RP, granulometric composition and the soil sorting complex were not analyzed. In experiment 1, the descriptive statistics of the data, the Shapiro-Wilk normality test and the Bartlett homogeneity of variance test, the Pearson correlation test and the multiple regression by the stepwise method were performed, both at 5% significance, in addition to of Ordinary Kriging with isoline maps. In experiment 2, the same normality and homogeneity of variance tests were performed, with subsequent analysis of means comparison using Tukey's test, both at 5% significance. The soil attributes that influenced maize yield were COAM, RP and pH, and indirectly the Ca contents. In fragile tropical soils, the agrosilvipastoral system represented an excellent strategy for conservation and environmental recovery.

Keywords: Soil fertility, Fragile soils, Spatial variability.

LISTA DE SIGLAS

Al – Alumínio

C – Carbono

Ca – Cálcio

COAM – Carbono Orgânico Associado aos Minerais

COP – Carbono Orgânico Particulado

COS – Carbono Orgânico do Solo

COT – Carbono Orgânico Total

CTC - Capacidade de Troca Catiônica

Ds - Densidade do solo

H – Hidrogênio

H+Al – Acidez Potencial

K – Potássio

MAC - Macroporosidade

Mg – Magnésio

MIC - Microporosidade

MO - Matéria orgânica

MOS – Matéria Orgânica do Solo

N - Nitrogênio

Na- Sódio

P – Fósforo

pH – Potencial Hidrogeniônico

PT - Porosidade Total

RP - Resistência à Penetração

T – Soma de Bases

TFSA – Terra Fina Seca ao Ar

V% - Saturação por base

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Médias mensais dos dados históricos de precipitação (mm) entre 2016 e 2020 e temperatura média no período experimental da região de Pindaré-Mirim, obtidos juntos à Agência Nacional de Águas e ao Instituto Nacional de Meteorologia, respectivamente.....38
- Figura 2. Desenho da área experimental mostrando a distribuição dos pontos de amostragem39
- Figura 3. Coeficientes de correlação de Pearson entre produtividade de milho e os atributos do solo nas camadas de 0-15 e 15-30 cm: a) Efeito diretamente proporcional; b) Efeito inversamente proporcional.46
- Figura 4. Distribuição espacial da produtividade do milho e suas variáveis preditoras na profundidade 0-15 cm: a) Produtividade do milho; b) COAM d) e e) pH.48
- Figura 5. Distribuição espacial da produtividade do milho e suas variáveis preditoras na profundidade 15-30 cm: a) Produtividade do milho; b) COAM d) e e) pH.49
- Figura 6. Coeficientes de correlação de Pearson entre carbono associado aos minerais e os atributos do solo nas camadas de 0-15 e 15-30 cm: a) Efeito diretamente proporcional; b) Efeito inversamente proporcional.50
- Figura 7. Coeficientes de correlação de Pearson entre resistência à penetração e os atributos do solo nas camadas de 0-15 e 15-30 cm: a) Efeito diretamente proporcional; b) Efeito inversamente proporcional.50
- Figura 8. Coeficientes de correlação de Pearson entre pH e os atributos do solo nas camadas de 0-15 e 15-30 cm: a) Efeito diretamente proporcional; b) Efeito inversamente proporcional...51
- Figura 9. Dispersão dos dados do COAM em relação aos teores de cálcio no solo, na camada 0-15 cm.53
- Figura 10. Dispersão dos dados da variável preditora e variável secundária: a) Resistência a penetração e COAM, e b) pH e COAM, na camada 0-15 cm.53

Figura 11. Médias mensais dos dados históricos de precipitação (mm) entre 2016 e 2020 e temperatura média no período experimental da região de Pindaré-Mirim, obtidos juntos à Agência Nacional de Águas e ao Instituto Nacional de Meteorologia, respectivamente.....	66
Figura 12. Desenho da área experimental mostrando a distribuição das áreas de uso da terra.	67
Figura 13. Desdobramento da interação entre os agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e Agrossilvipastoril) e as profundidades de coleta do solo (0-15 e 15-30 cm) para o atributo macroporosidade.	72
Figura 14. Gráfico biplot dos componentes principais (CP1 e CP2) e agrupamento dos atributos físicos, químicos e fracionamento de carbono, em diferentes agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e sistema Agrossilvipastoril), na Amazônia maranhense.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros da estatística descritiva dos atributos do solo e componentes de produtividade do milho em região de solo estruturalmente frágil.....	44
Tabela 2. Análise da estimativa dos parâmetros da regressão linear múltipla stepwise entre a produtividade do milho e os atributos do solo nas camadas 0-15 e 15-30 cm.	47
Tabela 3. Parâmetros do semivariograma ajustados para produtividade, COAM, RP e pH do solo nas profundidades 0-15 e 15-30 cm.	48
Tabela 4. Análise da estimativa dos parâmetros da regressão múltipla stepwise entre a carbono orgânico associado aos minerais e os atributos do solo nas camadas 0-15 e 15-30 cm.	52
Tabela 5. Valores médios dos atributos físicos do solo em função dos agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e Agrossilvipastoril) e das profundidades de coleta do solo (0-15 e 15-30 cm) em solo frágil da Amazônia maranhense.	71
Tabela 6. Valores médios dos atributos químicos do solo em função dos agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e Agrossilvipastoril) e das profundidades de coleta do solo (0-15 e 15-30 cm) em solo frágil da Amazônia maranhense.	73
Tabela 7. Valores médios das frações e estoques de carbono do solo em função dos agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e Agrossilvipastoril) e das profundidades de coleta do solo (0-15 e 15-30 cm) em solo frágil da Amazônia maranhense.....	74
Tabela 8. Análise de componentes principais (CP), autovalores, porcentagem da variância total e variância acumulada explicadas pelos componentes principais (VCP%) dos atributos do solo, em diferentes agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e sistema Agrossilvipastoril), na Amazônia maranhense.	74

SUMÁRIO

CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
CAPÍTULO I	18
1 Revisão Bibliográfica.....	19
1.1 Solos frágeis da Amazônia maranhense.....	19
1.2 Os agrossistemas na Amazônia maranhense.....	20
1.3 Intensificação sustentável da agricultura.....	22
1.4 Inter-relações dos atributos do solo e produtividade das culturas.....	24
2 Referências Bibliográficas	25
CAPÍTULO II	33
1 Introdução.....	36
2 Material e Métodos.....	37
2.1 Caracterização da área de estudo.....	37
2.2 Condução da lavoura de milho	38
2.3 Desenho amostral e coleta dos componentes de produtividade e do solo	39
2.4 Análises dos atributos do solo.....	40
2.5 Análise estatística.....	42
3 Resultados	42
4 Discussão.....	54
5 Conclusões	57
6 Referências Bibliográficas	57
CAPÍTULO III	62
1 Introdução.....	65
2. Material e Métodos.....	66
2.1 Caracterização da área de estudo.....	66
2.2 Histórico e condução das áreas de cultivo.....	67
2.3 Coleta e análise dos atributos do solo	68
2.4 Análise estatística.....	70
3 Resultados	71
4 Discussão.....	75
5 Conclusões	77
6 Referências Bibliográficas	77
APÊNDICE A - Coeficientes de correlação (r) dos atributos do solo da camada 0-15 cm do capítulo II.....	81
APÊNDICE B - Coeficientes de correlação (r) dos atributos do solo da camada 15-30 cm do capítulo II.....	82

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os constantes aumentos na produtividade agrícola ao longo do século 20 já se estabilizaram em muitos países (Van Ittersum et al., 2013), ao passo que a demanda mundial por alimentos aumenta 1,07% ao ano (United Nations, 2017). A previsão de uma população mundial que soma entre 9-11 bilhões de habitantes (ROOS et al., 2017), uma agropecuária cada vez mais subordinada a competição por terras, água e energia (Wheeler; Von Braun, 2013) e a necessidade de conter os efeitos negativos do setor primário sobre o meio ambiente (Crist; Mora; Engelman, 2017), tornam indispensável a substituição da lógica de abertura de novas áreas pela intensificação sustentável.

Na Amazônia maranhense, nós defendemos que a intensificação sustentável da agropecuária é perfeitamente aplicável e urgentemente necessária, tendo em vista, pelo menos duas características da região: a pobreza rural e a fragilidade ambiental. Com solos marginalizados, de textura arenosa, baixo conteúdo de matéria orgânica, baixos teores de cátions trocáveis, e naturalmente predispostos à fragilidade estrutural (Moura et al., 2013), o norte do Maranhão é sem dúvidas uma nova fronteira para expansão da produção de grãos e carne no Brasil.

As regiões com solos marginais, historicamente, possuem os maiores índices de pobreza rural (Guedes et al., 2012), ou seja, existe uma estreita relação entre fragilidade ambiental e social. No Maranhão, uma em cada duas pessoas estão abaixo da linha da pobreza e cerca de 93% dos extremamente pobres sobrevivem em pequenas cidades (IBGE, 2021). Por isso, podemos afirmar que o baixo rendimento das lavouras é um dos principais responsáveis pela pobreza no nosso estado.

Neste trabalho, partimos da hipótese que a intensificação sustentável da agropecuária, através do manejo conservacionista do solo em sistema agrossilvipastoril proporciona melhorias em determinados atributos físicos, químicos e as frações de matéria orgânica do solo e que esses influenciam a produção de milho.

Primeiramente, realizamos um levantamento bibliográfico sobre as principais temáticas que norteiam esta dissertação: Solos frágeis da Amazônia maranhense; Os agrossistemas na Amazônia maranhense; Intensificação sustentável da agricultura; e Inter-relações dos atributos do solo e produtividade das culturas.

No capítulo dois tentaremos responder a esta pergunta: Quais e como os atributos do solo influenciam a produtividade do milho em região de solo estruturalmente frágil? Almejando preencher uma lacuna do conhecimento pouco explorada cientificamente pelos pesquisadores

marenhenses, contudo, já muito compreensível por agricultores e técnicos, que geralmente relacionam a baixa produção da cultura à pobreza natural do solo.

No capítulo três discutiremos sobre a variação da fertilidade do solo em diferentes agrossistemas na Amazônia maranhense. Nessa última etapa, demonstraremos que a adoção da intensificação sustentável, através do sistema Agrossilvipastoril é uma alternativa de agrossistema capaz de substituir o modelo convencional da agricultura e pecuária no estado do Maranhão.

Ao final deste trabalho, almejamos determinar a variação nos atributos do solo em agrossistemas da Amazônia maranhense e suas relações com a produtividade do milho, visando definir as práticas de manejo capazes de aumentar o potencial de produção de milho, em solos estruturalmente frágeis. Os objetivos específicos da presente pesquisa foram: (i) Examinar a correlação entre a variação espacial dos atributos do solo e o rendimento do milho, em solo estruturalmente frágil; (ii) Comparar as variações nos atributos do solo em diferentes agrossistemas na Amazônia maranhense.

CAPÍTULO I

REFERENCIAL TEÓRICO

Capítulo elaborado de acordo com as normas da Revista Agroforestry Systems
<https://www.springer.com/journal/10457/submission-guidelines>

1 Revisão Bibliográfica

1.1 Solos frágeis da Amazônia maranhense

Na literatura internacional é comum o uso do termo *soil fragility* para designar solos arenosos, com baixos teores de matéria orgânica, baixa estabilidade de agregados, muito suscetíveis à erosão hídrica e com baixa resiliência (Frossard et al. 2016, Lal 2015, Reichert et al. 2016). A fragilidade estrutural é conhecida não somente pelas características já citadas, mas também pelos pequenos estoques de óxidos de ferro e alumínio, o que predispõem os solos à baixa estabilidade dos agregados e a maior coesão (Castro e Hernani 2015).

Esses solos estão presentes na Amazônia Maranhense, mais especificamente na Formação Itapecuru, essencialmente originados de rochas clásticas e minerais de quartzo-arenito, o que confere a esses solos a textura predominantemente franco-arenosa (Aguiar et al. 2010, Corrêa-Martins et al. 2019). Devido a textura arenosa, é observada a agregação fraca do solo, com baixa retenção de água, baixos teores de matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio (Fidalski et al. 2013, Reichert et al. 2016a), alta permeabilidade, susceptibilidade à compactação (Reichert et al. 2016) e a baixa capacidade de retenção de cátions (Moura et al. 2018).

Aliada a sua fragilidade natural, a baixa capacidade do solo de se recuperar a um estado de equilíbrio após um fenômeno perturbador torna o manejo em agrossistemas tropicais ainda mais dependentes de partículas finas cimentantes. Bonetti et al. (2017), ao compararem diferentes tipos de solo, observaram que aqueles com baixos teores de matéria orgânica, de argila e de óxidos de ferro exibiram menores índices de resiliência.

Outra característica que denota fragilidade estrutural aos solos da região é o clima tropical, uma vez que às condições de altas temperaturas e maior umidade tornam os solos altamente intemperizados e propícios à decomposição da matéria orgânica (Kay 2018). Ogle et al. (2005) afirmam que os solos do trópico úmido sob manejo exaustivo preservam somente 58% da matéria orgânica após a conversão da vegetação nativa, enquanto que em climas temperados, os solos mantêm 82% da matéria orgânica.

Periodicamente, os solos tropicais já são sujeitos aos processos naturais de perturbação, entre eles, os ciclos de umedecimento e secagem. Nos estudos conduzidos por Bonetti et al. (2017), em solos com baixos teores de matéria orgânica e argila, foi observada uma clara tendência na redução de macroporosidade após ciclos de umedecimento e secagem, devido ao grau de empacotamento e coesão entre as partículas. Assim, quanto mais perto as partículas são rearranjadas, maior será a área de contato entre as superfícies e maior será a densidade aparente.

Como consequência do caráter coesivo em condições tropicais com ciclos úmidos e secos repetidos, os solos se tornam fortemente endurecidos (Mullins 1990). A coesão do solo leva à emergência irregular de plântulas, crescimento deficiente das raízes e problema de drenagem e como consequência, o enraizamento é afetado e as culturas podem explorar apenas uma estreita camada superficial para sua sustentação (Moura et al. 2018).

Todas essas características estão relacionadas ao que Castro e Hernani (2015) denominam de fragilidade intrínseca, ou seja, aquela inerente a cada tipo de solo em equilíbrio dinâmico no seu ambiente. Contudo, essa fragilidade também pode ser induzida pela ação antrópica, através da modificação do uso da terra, da mobilização intensa do solo, ou ainda pela insuficiente reposição de nutrientes. A influência do manejo em diferentes agrossistemas sobre a fertilidade do solo será tratado no tópico seguinte.

1.2 Os agrossistemas na Amazônia maranhense

A expansão das áreas agrícolas, a extração de madeira e a expansão da infraestrutura são apontadas por Geist e Lambin (2002) como as causas diretas do desmatamento na Amazônia. Na região é possível identificar vários tipos de usos da terra, como por exemplo na agricultura, o cultivo de soja, algodão, milho e arroz; e na pecuária, existem áreas com pastagens bem manejadas ou degradadas, em que o uso das braquiárias é predominante.

Historicamente, o aumento das áreas com pastagens cultivadas na Amazônia pode ser explicado pela expansão da pecuária de corte desenvolvida rapidamente a partir de meados da década de 1960, com a abertura de rodovias, dentre as quais a Belém-Brasília (BR-10), e políticas públicas de incentivos fiscais para a produção de alimentos, que tornavam a região amazônica a nova fronteira agrícola do país (Dias-Filho 2014).

Dados do Projeto Terra Class (INPE e EMBRAPA 2016) indicam que 62% da área desmatada da Amazônia brasileira no ano de 2014 foram utilizados com pastagens plantadas. A conversão das florestas nativas em pastagens ou campos agrícolas é caracterizada pela abertura de clareiras por práticas de corte, derrubada e queima da vegetação, conhecida na região como “coivara” ou “agricultura de corte e queima”, realizada principalmente por agricultores familiares.

Nesse modelo de sucessão, o fogo desempenha papel fundamental, a curto prazo, no aumento expressivo das quantidades de potássio, cálcio e magnésio, em razão da adição de cinzas ao solo (Araújo et al. 2011). Kleinman et al. (1995) defendem que essa prática expõe fisicamente o solo, elimina a cobertura vegetal, contudo inicialmente melhora a fertilidade do solo e diminui a acidez, o que no curto prazo justifica a sua adoção.

Davidson et al. (2008) ao comparar as emissões de gases de efeito estufa pelo solo em sistemas tradicionais de corte e queima e em roças sem queima (*mulching*), na Amazônia, concluíram que as emissões totais de gases de efeito estufa são, pelo menos, cinco vezes menores na roça sem queima. Estimativa realizada por Dias-Filho et al. (2001) demonstra que a conversão de floresta amazônica em pastagens pode emitir para atmosfera cerca de 100 a 200 Mg ha⁻¹ de C, em função do processo de desmatamento e queima da biomassa aérea.

O processo de conversão da terra nos trópicos também é uma das maiores causas de perda de biodiversidade, com efeitos negativos tanto na diversidade de espécies e funcionalidade dos microrganismos do solo quanto na sustentabilidade da produção agrícola (FAO 2012). Durigan et al. (2017) demonstraram que a mudança no uso da terra diminuiu pelo menos 21,60% da matéria orgânica do solo.

Em áreas agrícolas maiores, o problema é outro, o revolvimento anual do solo, que é caracterizado pelo preparo da terra através de uma gradagem de discos para incorporar o calcário e uma grade leve para nivelar o terreno (Carvalho et al. 2009). Esse preparo convencional do solo expõe a matéria orgânica à 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. 2016, Berisso et al. 2013), o que torna o solo susceptível à erosão hídrica, especialmente no trópico úmido.

A estrutura do solo também é afetada pela sua inversão constante, com impactos principalmente em macroagregados (> 0,250 mm), densidade, macroporosidade, umidade e temperatura do solo (Ribeiro Filho et al. 2013). Rodrigues et al. (2017), por sua vez, contrastaram uma pastagem de *Urochloa brizantha* cv. Marandu sob cultivo convencional e preparo mínimo do solo e descreveram a segunda como aquela com maior teor de matéria orgânica e menor acidez na camada superficial de solo.

Pesquisas têm demonstrado acúmulos nos primeiros 40 cm de C no solo na ordem de 22,86 Mg à 94,60 Mg C ha em pastagens bem manejadas, variando conforme o tempo de formação do pasto (Rosendo e Rosa 2012, Mascarenhas et al. 2017). Essa eficiência das pastagens no acúmulo de C ocorre pela elevada entrada de biomassa no solo e a ausência do seu revolvimento.

As características intrínsecas do solo somadas ao manejo inadequado da lavoura de grãos ou pecuária resultam em baixos índices de rendimento. Na microrregião de Pindaré-Mirim, por exemplo, a produtividade média de milho não ultrapassa 2 Mg ha⁻¹, enquanto em outras regiões do estado com solos mais férteis, o rendimento médio da cultura atinge mais de

6 Mg ha⁻¹ (IBGE 2021). Ao analisar os dados de 2019 do Atlas Digital das Pastagens Brasileiras, observamos que a taxa de lotação média das pastagens do município de Pindaré-Mirim é de um pouco mais de 0,60 UA ha⁻¹, enquanto que no estado, esse indicador é 26% maior, atingindo uma taxa média de 0,92 UA ha⁻¹ em todo território brasileiro (LAPIG 2021).

1.3 Intensificação sustentável da agricultura

A utilização do termo intensificação sustentável da agricultura está focada na produção de cereais através do avanço da ciência das plantas e do solo para alcançar o aumento contínuo no rendimento de cereais (intensificação) e sem dano ambiental (sustentável) (Cassman 1999, Griffon 2013). Segundo Chevassus e Griffon (2008), essa intensificação é baseada na aplicação das funcionalidades naturais dos ecossistemas, em busca da regulação biológica nos sistemas agrícolas.

A pressão constante sobre a produção agrícola aliada à crescente degradação ambiental demonstra a importância desse modelo, pois esse otimiza a produção de alimentos por unidade de área, levando em consideração uma gama de aspectos da sustentabilidade, dos impactos sociais, políticos e ambientais (Godfray e Garnett 2014). A intensificação sustentável busca também solucionar a lacuna de rendimento dos cultivos, que é estimada pela diferença entre o potencial de rendimento da cultura e a média atingida pelos agricultores, numa escala de interesse temporal e espacial (Ray et al. 2013, Schierhorn et al. 2014, Tittone et al. 2013).

Estudos têm demonstrado que uma visão multidisciplinar da agricultura poderia resultar na melhor utilização dos mecanismos de regulação biológica em diferentes níveis: manejo da cultura, desenhos dos sistemas de cultivos, arranjo e manejo da paisagem (Mediene et al. 2011). Segundo Tittone e Giller (2013), através da integração e avanços científicos das áreas de fisiologia das plantas, ecofisiologia vegetal e ciência do solo, foi possível o aumento da capacidade de rendimento das principais culturas, estreitando as lacunas de produtividade por meio da implementação de formas de agricultura de precisão, em especial aquelas que possuem ênfase na intensificação ecológica da agricultura.

A intensificação sustentável da agricultura destina-se a desenvolver práticas agronômicas que imitam a estrutura do ecossistema a partir das observações sobre o funcionamento da natureza, considerando a gestão integrada dos recursos naturais locais (Doré et al. 2011, Malézieux 2012). Esta ideia baseia-se no pressuposto que os ecossistemas naturais são adaptados às restrições locais, devido a um longo processo de seleção natural (Ewel 1999). Portanto, a intensificação sustentável incorpora certas características dos ecossistemas naturais que melhoram alguns dos atributos dos agrossistemas, como a produtividade (Bell et al., 2014),

estabilidade (Pfisterer e Schmid, 2002) e resiliência (Cabell e Oelofse 2012, Lamine 2014).

Os sistemas agroflorestais no Trópico Úmido imitam a estrutura e o funcionamento de florestas parecem ser particularmente adequados para a aplicação do conceito “mimetismo da natureza” (Malézieux 2012). Esses sistemas englobam um conjunto diversificado de práticas multifuncionais, que intencionalmente integram árvores ou arbustos com culturas ou pecuária em um único campo agrícola (Lovell 2018). Além do seu potencial para melhorar a produtividade agrícola e a resiliência dos agrossistemas, as práticas agroflorestais podem promover o sequestro de carbono (Lorenz e Lal 2014), a biodiversidade (Torralba et al. 2016), a eficiência do uso de nutrientes (Dollinger e Jose 2018) e reduzir a erodibilidade do solo (Liu et al. 2016).

No que diz respeito aos benefícios dos sistemas agrossilvipastoris para o solo, podemos classificar os resultados em físicos, químicos e biológicos. Conforme Carvalho et al. (2016) os sistemas integrados melhoram a qualidade física do solo, ao aumentar a macroporosidade e a microporosidade em profundidade, além de diminuir a densidade do solo na camada superficial. Bono et al. (2012) ao avaliarem solo sob sistema agrossilvipastoril e monocultivo de lavoura e pastagem, constataram que o manejo integrado apresentou velocidade de infiltração básica e acumulada de água no solo mais próximos dos observados na mata nativa. Outras pesquisas semelhantes em sistemas integrados também corroboram com esses autores (Assis et al. 2015, Silva et al. 2015).

Vários estudos demonstram os incrementos nos teores de nutrientes em sistemas de agrossilvipastoris, geralmente, por dois motivos: pela rápida ciclagem de nutrientes no solo, disponibilizados na forma mineralizada por meio das fezes e urina (Balbinot Jr. et al. 2009), e a eficiência no uso de fertilizantes, em função das diferentes necessidades das culturas em rotação (Macedo 2009). Alguns trabalhos têm mostrado o aumento nos teores de P, K e matéria orgânica nos primeiros 10 cm de profundidade, e também relataram redução dos valores de pH (Freire et al. 2012, Machado et al. 2011, Freitas et al. 2010).

Uma das grandes vantagens dos sistemas agroflorestais é a melhoria no aproveitamento dos nutrientes presentes ou adicionados. Plantas com sistemas radiculares e exigências nutricionais diferentes conseguem otimizar o aproveitamento de nutrientes e, além disso, em muitos casos, a inserção da pastagem ocorre imediatamente após a colheita da cultura de grãos, o que permite um aproveitamento dos resíduos da adubação que foi feita anteriormente.

Sistemas mais diversificados são importantes para repor e manter a matéria orgânica do solo (Assis et al. 2015). Nesse sentido, a integração entre culturas aumenta as concentrações

de carbono orgânico no solo, devido ao crescimento contínuo de vegetais na área e diferentes fontes de material orgânico, podendo ainda ser utilizada como indicadora da qualidade do solo (Balbinot Jr. et al. 2009, Loss et al. 2012), pois, a matéria orgânica proporciona solos bem estruturados, o que favorece uma maior taxa de infiltração e a penetração das raízes no perfil do solo (Faleiro et al. 2008). Os resultados também demonstram que o tipo de manejo e o consórcio de culturas com rotação influenciam diretamente na ocorrência de comunidades da fauna do solo em sistemas integrados, indicando que o aporte de carbono e a utilização de sistema de plantio direto melhoram as condições para o desenvolvimento dos organismos (Ferreira 2015, Portilho et al. 2013).

1.4 Inter-relações dos atributos do solo e produtividade das culturas

O solo é estratégico para produção de biomassa, e essa afirmação nos faz retornar à definição mais comum de qualidade do solo, que pode ser entendida como “a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro de limites do ecossistema gerenciado, para sustentar plantas e animais, a produtividade, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar, e apoiar a saúde humana e a habitação” (Karlen et al. 1997).

A caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo é fundamental para a compreensão dos efeitos do manejo da terra em função do solo e serviços ecossistêmicos, que envolvem a qualidade da água, o sequestro de carbono e a biodiversidade (Stutter et al. 2009). No entanto, ainda são poucos os estudos que descrevem a variabilidade espacial de grande quantidade de atributos do solo e suas inter-relações em uma escala de paisagem específica (Rivero, Grunwald, Bruland 2007).

A variabilidade espacial da produtividade das culturas está atrelada a diversos fatores, como atributos do solo, taxa de germinação, plantas daninhas, pragas, doenças, entre outros (Oerke 2006). Mueller et al. (2010), em uma escala global, classificaram as restrições naturais do solo para a produtividade em três grupos principais: o primeiro grupo inclui os regimes térmico e de umidade dos solos, o segundo grupo de restrições está relacionado ao substrato inadequado (solos rasos, pedregosos, duros, horizontes anaeróbicos, salinos ou contaminados) e o terceiro grupo inclui a topografia.

No solo existem diversas inter-relações entre os atributos físicos, químicos e biológicos que controlam os processos e os aspectos relacionados à sua variação no tempo e no espaço (Carneiro et al. 2009). Os atributos do solo são classificados como inertes ou dinâmicos. Os atributos inertes, como o tipo de solo e a textura, pouco mudam com uso do solo ou práticas

de manejo (Duval et al. 2016). Os indicadores como textura, densidade do solo, porosidade e estabilidade de agregados também estão correlacionados com processos hidrológicos como erosão, aeração, escoamento, taxa de infiltração e capacidade de retenção de água (Schoenholtz et al. 2000). A resistência do solo através do perfil do solo é dependente do teor de umidade no momento da medição, e para uma interpretação significativa e comparação temporal de dados, deve ser medido com o mesmo teor de umidade (Oliver et al. 2013).

O pH do solo, capacidade de troca catiônica, matéria orgânica e níveis de nutrientes são os principais atributos químicos utilizados na avaliação da saúde do solo, principalmente quando se considera a capacidade do solo de sustentar lavouras de alto rendimento (Kelly et al. 2009). Em geral, as variações positivas na produção em função dos teores de MOS, estão relacionadas ao melhor aproveitamento da água e dos nutrientes do solo devido ao melhor ambiente para o crescimento das raízes e absorção, principalmente da água e do nitrogênio (Moura et al. 2013). Isto significa que o aumento da matéria orgânica em solos agrícolas pode ajudar muito a diminuir a incerteza da produtividade anual de cereais, o que é uma questão de grande preocupação para os agricultores do trópico, onde pequena variação na oferta de água pelas chuvas pode causar estresse nas culturas, se suas raízes não puderem explorar um maior volume de solo.

A determinação da variação dos atributos que são influenciados pelo manejo e uso do solo é importante para criação de propostas de manejo que visem à sustentabilidade do sistema (Behera e Shukla 2014). A definição de práticas culturais é complexa e deve ser realizada em função de um conjunto de indicadores específicos (atributos) e suas inter-relações, em virtude do que se tem verificado que indicadores isolados não são suficientes para explicar a perda ou o ganho potencial dos cultivos de determinado solo (Betzek et al. 2017).

2 Referências Bibliográficas

Aguiar ADCF, Bicudo SJ, Sobrinho JRSC, Martins ALS, Coelho KP, de Moura EG (2010) Nutrient recycling and physical indicators of an alley cropping system in a sandy loam soil in the pre-Amazon region of Brazil. *Nutr Cycl Agroecosyst* 86(2):189-198. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9283-6>

Araújo EA, Ker JC, Mendonça ES, Silva IR, Oliveira EK (2011) Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. *Acta Amaz [online]* 41:103-114. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672011000100012>

Assis PCR, Stone LF, Medeiros JC, Madari BE, Oliveira JM, Wruck FJ (2015) Atributos físicos

do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 19(4): 309–316. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p309-316>

Balbinot JRAA, Moraes A, Veiga M, Pelissari A, Dieckow J (2009) Integração lavoura-pecuária: Intensificação de uso de áreas agrícolas. *Ciência Rural* 39: 1925-1933. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000107>

Behera SK, Shukla AK (2014) Spatial Distribution of Surface Soil Acidity, Electrical Conductivity, Soil Organic Carbon Content and Exchangeable Potassium, Calcium and Magnesium in Some Cropped Acid Soils of India. *Land Degradation & Development* 26(1): 71–79. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2306>

Bell LW, Moore AD, Kirkegaard JA (2014) Evolution in crop–livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in Australia. *European Journal of Agronomy* 57: 10-20. <https://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.007>

Berisso FE, Schjonning P, Keller T, Lamandé M, Simojoki A, Iversen BV, Alakukku L, Forkman J (2013) Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction *Geoderma* 195-196: 184-191. <https://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.002>

Bernardi ADC, Bettiol GM, Ferreira RDP, Santos KEL, Rabello LM, Inamasu RY (2016) Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. *Precision agriculture* 17(6): 737-752. <https://dx.doi.org/10.1007/s11119-016-9446-9>

Betzek NM, Godoy ES, Leones CB, Sobjak R, Bier VA, Mercante E (2017) Interpolation methods for thematic maps of soybean yield and soil chemical attributes. *Semina: Ciências Agrárias* 38(2). <https://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n2p1059>

Bonetti J de A, Anghinoni I, De Moraes MT, Fink JR (2017) Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. *Soil & Tillage Research* 174:104–112. <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.06.008>

Cabell J, Oelofse M (2012) An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. *Ecology and Society* 17(1). <http://dx.doi.org/10.5751/ES-04666-170118>

Carneiro MAC, Souza ED, Reis EF, Pereira HS, Azevedo WR (2009) Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33(1): 147-157. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000100016>

Carvalho JS, Kunde RJ, Stocker CM, Lima ACR, Silva JLS (2016) Evolução de atributos físicos, químicos e biológicos em solo hidromórfico sob sistemas de integração lavoura-pecuária no bioma Pampa. *Pesq. agropec. bras.* [online] 51(9): 1131-1139. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900012>

Carvalho JLN, Cerri CEP, Feigl BJ, Picollo MC, Godinho VP, Cerri CC (2009) Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. *Soil Tillage Research* 103: 342-349. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.022>

Cassman KG (1999) Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96(11): 5952-5959. <https://dx.doi.org/10.1073/pnas.96.11.595>

Castro SS, Hernani LC (2015) Solos Frágeis. Caracterização, manejo e sustentabilidade. Brasília, Embrapa: 367.

Chevassus B, Griffon M (2008) La nouvelle modernité: une agriculture productive à haute valeurécologique. *Déméter: Économie et Stratégies Agricoles* 14:48.

Corrêa-Martins FJ, Mendes JC, Bertolino LC, Mendonça JDO (2019) 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* 41(3): 514-530. http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_514_530

Crist E, Mora C, Engelman R (2017) The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science* 356(6335): 260-264. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aal2011>

Davidson EA, Sa TDA, Carvalho CJR, Figueiredo RO, Kato MSA, Kato OR, Ishida FY (2008) An integrated greenhouse gas assessment of an alternative to slash-and-burn agriculture in eastern Amazônia. *Global Change Biology* 14: 998-1007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01542.x>

Dias-Filho MB (2014) Recuperação de pastagens degradadas na Amazônia: desafios, oportunidades e perspectivas. In: Sambuichi RHR et al. (Org.). Políticas agroambientais e sustentabilidade: desafios, oportunidades e lições aprendidas. Brasília: 149-169.

Dias-Filho MB, Davidson EA, Carvalho CJR Linking (2001) biogeochemical cycles to cattle pasture management and sustainability in the Amazon Basin. In: McClain ME, Victoria RL, Richey JE, eds. *The biogeochemistry of the Amazon Basin*. New York, Oxford University Press: 84-105.

Dollinger J, Jose S (2018) Agroforestry for soilhealth. *Agroforestry systems* 92: 1-7, 213–219 <https://dx.doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>

Doré T, Makowski D, Malézieux E, Munier-Jolain N, Tchamitchian M, Titttonell P (2011) Facin gup to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concept sand knowledge. *European Journal of Agronomy* 34(4): 197–210. <https://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.006>

Durigan MR, Cherubin MR, De Camargo PB, Ferreira JN, Berenguer E, Gardner TA, Barlow J, Dias CTS, Signor D, Junior RCO, Cerri CEP (2017) Soil Organic Matter Responses to Anthropogenic Forest Disturbance and Land Use Change in the Eastern Brazilian Amazon. *Sustainability* 9(3): 1-16. <https://dx.doi.org/10.3390/su9030379>

Duval ME, Galantini JA, Martínez JM, López FM, Wall LG (2016) Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable and management: Influenceof site featuresandseasonality. *Soil & Tillage Research* 159: 9-22.

<https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.01.004>

Ewel JJ (1999) Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agroforestry systems* 45(1-3): 1-21. <https://dx.doi.org/10.1.1.477.4943>

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021) Sítio Agricultura de Conservação. Disponível em: <http://www.fao.org/ag/ca/es/> Acessado em 20 janeiro de 2021

Ferreira SA (2015) Avaliação visual da estrutura e macrofauna edáfica em sistemas de uso do solo no subtropical brasileiro. Curitiba, Dissertação de mestrado na Universidade Federal de Curitiba

Fidalski J, Tormena CA, Alves SJ, Auler PAM (2013) Influence of sand fractions on water retention and availability in Caiuá and Paranaíba sandstone formations. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37(3): 613-621. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000300007>

Freire FM, Coelho AM, Barros NF, Barros Filho NF & NEVES JCL (2012) Manejo da fertilidade do solo no Sistema de Integração lavoura-pecuária-floresta. *Infor. Agrop.*, 31: 25-36

Frossard E, Buchmann N, Bünemann EK, Kiba DI, Lompo F, Oberson A (2016) Soil properties and not inputs control carbon: nitrogen: phosphorus ratios in cropped soils in the long term soil 2(1): 83-99. <https://dx.doi.org/10.5194/soil-2-83-2016>

Geist HJ, Lambin EF (2002) Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience* 52: 143-150. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2)

Godfray HCJ, Garnett T (2014) Food security and sustainable intensification. *Philosophical transactions of the Royal Society B: biological sciences* 369 (1639): 20120273. <https://dx.doi.org/10.1098/rstb.2012.0273>

Griffon M (2013) Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive?. Editions Quae 227

Guedes GR, Brondízio ES, Barbieri AF, Anne R, Penna-Firme R, D'Antona ÁO (2012) Poverty and inequality in the rural Brazilian Amazon: a multidimensional approach. *Human ecology* 40(1): 41-57. <https://doi.org/10.1007/s10745-011-9444-5>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores IBGE: estatística da produção agrícola 2020. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br> Acessado em: 01 abril de 2021

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Síntese de indicadores sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/condicoes-de-vida-desigualdade-e-pobreza/9221-sintese-de-indicadores-sociais.html?=&t=downloads> Acessado em: 01 abril de 2021

INPE; EMBRAPA. Projeto TerraClass: levantamento de informações de uso e cobertura da terra na Amazônia Legal brasileira – 2004-2014. São José dos Campos, 2016. Disponível em: http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php Acessado em: 10 janeiro de 2021

Kelly B, Allan C, Wilson BP (2009) Soil indicator sand their use by farmers in the Billa bong Catchment, southern New South Wales. *Australian Journal of Soil Research* 47: 234-242. <https://dx.doi.org/10.1071/SR08033>

Kay BD (2018) Soil structure and organic carbon: a review. In: *Soil processes and the carbon cycle*. CRC press: 169-197

Kiehl, EJ (1979) *Manual de edafologia: relação solo planta*. São Paulo, Agronômica Ceres: 422

Kleinman PJ, Pimentel D, Bryant RB (1995) The ecological sustainability of slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystems&Environment* 52(2-3): 235-249. [https://dx.doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)00531-I](https://dx.doi.org/10.1016/0167-8809(94)00531-I)

Lal R (2015) Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability* 7(5): 5875–5895. <https://dx.doi.org/10.3390/su7055875>

Lamine C (2014) Sustainability and Resilience in Agrifood Systems: Reconnecting Agriculture, Food and the Environment. *Sociologia Ruralis* 55(1): 41–61. <http://dx.doi.org/0.1111/soru.12061>

LAPIG. Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento. Atlas Digital das Pastagens Brasileiras. Disponível em: <https://pastagem.org/map> Acessado em 10 janeiro de 2021.

Liu W, Zhu C, Wu J, Chen C (2016) Are rubber-based agroforestry systems effective in controlling rains splash erosion?. *Catena* 147: 16-24. <https://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.034>

Lorenz K, Lal R (2014) Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34(2): 443–454. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>

Loss A, Pereira MG, Beutler SJ, Perin A, Anjos LHC (2012) Densidade e fertilidade do solo sob sistemas de plantio direto e de integração lavoura-pecuária no Cerrado. *Revista de Ciências Agrárias* 55: 260-268. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2012.066>

Lovell ST, Dupraz C, Gold M, Jose S, Revord R, Stanek E, Wolz KJ (2018) Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polyculture sand the design oflong-term field trials. *Agroforestry systems* 92(5): 1397-1415. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-017-0087-4>

Macedo MCM (2009) Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Brasília 38(1): 133-146. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300015>

Machado LAZ, Balbino LC, Cecon G (2011) Integração lavoura-pecuária-floresta. Estruturação dos sistemas de integração lavoura-pecuária Dourados, Embrapa.

Malézieux E (2012) Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable*

Development 32(1):15-29. <https://dx.doi.org/10.1007/s13593-011-0027-z>

Mascarenhas ARP, Scoti MSV, Melo RR, Corrêa FL de O, Souza EFM, Andrade RA, Bergamin AC, Müller MW (2017) Atributos físicos e estoques de carbono do solo sob diferentes usos da terra em Rondônia, Amazônia Sul-Occidental. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo 37(89): 19-27. <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.89.1295>

Mediene S, Valantin-Morison M, Sarthou JP, Tourdonnet S, Gosme M, Bertrand M, Roger-Estrade J, Aubertot JN, Rusch A, Motisi N, Pelosi C, Doré T (2011) Agroecosystem management and biotic interactions: a review. Agronomy for Sustainable Development 31(3): 491-514. <https://dx.doi.org/10.1007/s13593-011-0009-1>

Moura E, Portela S, Macedo V, Sena V, Sousa C, Aguiar A (2018) Gypsum and Legume Residue as a Strategy to Improve Soil Conditions in Sustainability of Agrosystems of the Humid Tropics. Sustainability 10(4). <https://dx.doi.org/10.3390/su10041006>

Moura EG, Sena VGL, Correa MS, Aguiar AFC (2013) The Importance of an Alternative for Sustainability of Agriculture around the Periphery of the Amazon Rainforest. Recent patents on food, nutrition & agriculture 5(1): 70-78. <https://dx.doi.org/10.2174/2212798411305010011>

Moussadek R, Mrabet R, Dahan R, Zouahri A, El Mourid, M, Van Ranst, E (2014) Tillage system affects soil organic carbon storage and quality in central Morocco. Applied and Environmental Soil Science: 1-8. <https://dx.doi.org/10.1155/2014/654796>

Mueller L, Schindler U, Mirschel W, Shepherd TG, Ball BC, Helming K (2010) Assessing the productivity function of soils. A review Agronomy for sustainable development 30(3): 601-614. <https://doi.org/10.1051/agro/2009057>

Mullins CE, Macleod DA, Northcote KH, Tisdall JM, Young IM (1990) Hard setting soils: behavior, occurrence, and management. Advances in soil science. Springer, New York, NY: 37-108

Ogle SM, Breidt FJ, Paustian K (2005) Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. Biogeochemistry 72(1): 87-121. <https://dx.doi.org/10.1007/s10533-004-0360-2>

Oliver DP, Bramley RGV, Riches D, Porter I, Edwards J (2013) Review: soil physical and chemical properties as indicators of soil quality in Australian viticulture. Australian Journal of Grape and Wine Research 19:129-139. <https://dx.doi.org/10.1111/ajgw.12016>

Oerke EC (2006) Crop losses to pests. The Journal of Agricultural Science 144(1): 31-43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>

Pfisterer AB, Schmid B (2002) Diversity-dependent production can decrease the stability of ecosystem functioning. Nature 416(6876): 84. <https://dx.doi.org/10.1038/416084a>

Ray DK, Mueller ND, West PC, Foley JA (2013) Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. PLoS One 8(6): 66428. <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>

Reichert JM, Amado TJC, Reinert DJ, Rodrigues MF, Suzuki LEAS (2016) Land use effects on subtropical, sandy soil under sandization/desertification processes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 233: 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.039>

Reichert JM, Rodrigues MF, Bervald CMP, Kato OR (2016) Fire-Free Fallow Management by Mechanized Chopping of Biomass for Sustainable Agriculture in Eastern Amazon: Effect on Soil Compactness, Porosity, and Water Retention and Availability. *Land Degradation & Development* 27:1403-1412. <https://dx.doi.org/10.1002/ldr.2395>

Ribeiro Filho AA, Adams C, Murrieta RSS (2013) The impacts of shifting cultivation on tropical forest soil: a review. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Humanas* 8(3): 693-727. <http://dx.doi.org/10.1590/S1981-81222013000300013>

Rivero RG, Grunwald S, Bruland GL (2007) Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland. *Geoderma* 140(4): 428-443. <https://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.04.026>

Rodrigues M, Rabêlo FHS, De Castro HA, Roborero D, De Carvalho MAC, Roque CG (2017) Changes in chemical properties by use and management of an Oxisol in the Amazon biome. *Revista Caatinga, Mossoró* 30(2): 278-286. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n202rc>

Rosendo JS, Rosa R (2012) Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de Cerrado. *Soc. nat. [online]* 24(2): 359-376. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132012000200014>

Schierhorn F, Faramarzi M, Prishchepov AV, Koch FJ, Müller D (2014) Quantifying yield gaps in wheat production in Russia. *Environmental Research Letters* 9(8): 084017. <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084017>

Schoenholtz SH, Miegroet HV, Burger JA (2000) Review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138: 335-356. [https://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)

Signor D, Deon MD, Camargo PB, Cerri CEP (2018) Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under different land uses in Eastern Amazon. *Scientia Agricola* 75(3): 225-232. <https://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0089>

Stutter MI, Lumsdon DG, Billett MF, Low D, Deeks LK (2009) Spatial variability in properties affecting organic horizon carbon storage in up land soils. *Soil Science Society of America Journal* 73 (5): 1724-1732. <https://dx.doi.org/10.2136/sssaj2008.0413>

Tittonell PA, Ken E, Giller B (2013) When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African small holder agriculture. *Field Crops Research* 143: 76-90. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.007>

Torralba M, Fagerholm N, Burgess PJ, Moreno G, Plieninger T (2016) Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230: 150-161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>

UNITED NATIONS (2017) Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects: The 2017 revision, key findings and advance tables. In: Technical Report. Working Paper, ESA/P/WP: 241

Usovich B, Lipiec J (2017) Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. *Soil and Tillage Research* 174: 241-250. <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.07.015>

Van Ittersum MK, Cassman KG, Grassini P, Wolf J, Tittonell P, Hochman Z (2013) Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*: 143: 4-17. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

Wheeler T, Von Braun J (2013) Climate change impacts on global food security. *Science* 341(6145): 508-513. <https://dx.doi.org/10.1126/science.1239402>

CAPÍTULO II

QUAIS E COMO OS ATRIBUTOS DO SOLO INFLUENCIAM A PRODUTIVIDADE DO MILHO EM REGIÃO DE SOLO ESTRUTURALMENTE FRÁGIL?

Capítulo elaborado de acordo com as normas da Revista Soil Use and Management
<https://onlinelibrary.wiley.com/page/journal/14752743/homepage/ForAuthors.html#prep>

QUAIS E COMO OS ATRIBUTOS DO SOLO INFLUENCIAM A PRODUTIVIDADE DO MILHO EM REGIÃO DE SOLO ESTRUTURALMENTE FRÁGIL?

Resumo: Os solos frágeis representam uma nova fronteira produtiva e ocupam a maior porção da Amazônia maranhense. O objetivou-se com este trabalho examinar a correlação entre a variação espacial dos atributos do solo e o rendimento do milho, em solo estruturalmente frágil. O experimento foi conduzido em cultivo de milho, entre novembro/2019 e maio/2020, no município de Pindaré Mirim, MA, Brasil. Para avaliar as associações do rendimento do milho e atributos do solo foram delimitados 119 pontos de amostragem georreferenciados, em uma grade uniforme de 9 m x 8 m, totalizando uma área experimental de 10.000m². O rendimento do milho foi amostrado em 6 m² ao redor dos pontos de amostragens. Para determinação dos atributos físicos (densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total) foi aberta uma trincheira de 30 x 30 x 30 cm, próxima a cada ponto de amostragem, coletando-se o solo em duas profundidades: 0-15 e 15-30 cm. A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada no quarto dia após a chuva, com duas coletas por ponto de amostragem, utilizando o penetrômetro digital Falker. Simultaneamente, para determinação da umidade do solo, foram coletadas duas amostras deformadas de solo por ponto. Para quantificação das variáveis químicas (pH, P, Ca, Mg, K, Na, Al, H+Al, CTC, T e V%), composição granulométrica (areia fina, areia grossa, silte e argila) e frações de carbono (COT, COP e COAM) foram coletadas quatro amostras de solo simples e deformadas por ponto georreferenciado nas mesmas profundidades. Quanto as variáveis predictoras, os atributos do solo que foram diretamente proporcionais à produtividade do milho foram o COAM (r=0,58), COT (r=0,46) e silte (r=0,31), na camada 0-15 cm. Entre esses atributos, apenas COT (r=0,32) e COAM (r=0,40) se correlacionaram positivamente com a produtividade na camada inferior. A RP (r=0,44; r=0,45) e pH (r=0,46; r=0,43) foram inversamente proporcionais com a produtividade do milho, em ambas camadas. As variáveis do solo que determinaram a produtividade do milho, em solo estruturalmente frágil, são carbono orgânico associado aos minerais, resistência a penetração e pH. O acréscimo do carbono orgânico associado aos minerais é favorecido pelo aumento dos teores de cálcio e pode diminuir a resistência à penetração e controlar a acidez do solo. Quanto as variáveis secundárias, os atributos do solo que apresentaram correlações positivas e não-desprezíveis com o COAM foram o COT (r=0,71), Ca (r=0,49), silte (r=0,42), T (r=0,36), Mg (r=0,35) e CTC (r=0,32), na camada 0-15cm. Entre esses atributos, apenas o COT (r=0,59) se correlacionou com o COAM na profundidade 15-30cm. A variável do solo que apresentou maior coeficiente de determinação com o COAM foi o Ca na profundidade 0-15 cm e o pH como aquela que apresenta maior impacto com alteração da variável predictor. Assim como o maior coeficiente de determinação da RP e pH foi com o COAM na profundidade 0-15 cm. As variáveis do solo que determinaram a produtividade do milho, em solo estruturalmente frágil, foram COAM, RP e pH. O acréscimo do COAM é favorecido pelo aumento dos teores de Ca e pode diminuir a RP e controlar a acidez do solo.

Palavras-chave: Variabilidade espacial, Matéria orgânica, Amazônia maranhense.

WHAT AND HOW DO SOIL ATTRIBUTES INFLUENCE MAIZE PRODUCTIVITY IN A STRUCTURALLY FRAGILE SOIL REGION?

Abstract: Fragile soils represent a new productive frontier and occupy the largest portion of the Maranhense Amazon. The objective of this work was to examine the correlation between the spatial variation of soil attributes and corn yield, in a structurally fragile soil. The experiment was carried out in corn cultivation, between November and May, during the 2019/2020 agricultural year, in the municipality of Pindaré Mirim, MA, Brazil. To assess aggregation of corn yield and soil attributes, 119 georeferenced sampling points were delimited, in a uniform degree of 9 m x 8 m, totaling an experimental area of 10,000 m². Corn yield was sampled in 6 m² around the sampling points. To determine density attributes (density, macroporosity, microporosity and total porosity), a 30 x 30 x 30 cm trench was opened, close to each sampling point, collecting the soil in two profiles: 0-15 and 15-30 cm. The soil mechanical resistance to penetration was provided on the fourth day after the rain, with two collections per sampling point, using the Falker® digital penetrometer. Simultaneously, to determine soil moisture, two soil deformations per point were collected at depths 0-15 and 15-30 cm. To quantify the variables, particle size composition and carbon fractions collected were collected from simple soil and deformed by georeferenced point at the depths being analyzed, H, T and V%) and organic carbon fractions (COT, COP and COAM). As for the variables As predictors, the soil attributes that were directly proportional to corn yield were COAM ($r = 0.58$), COT ($r = 0.46$) and silt ($r = 0.31$), in the 0-15cm layer. Among these attributes, only COT ($r = 0.32$) and COAM ($r = 0.40$) were positively correlated with productivity in the lower layer. RP ($r = 0.44$; $r = 0.45$) and pH ($r = 0.46$; $r = 0.43$) were inversely proportional to corn yield, in both layers. The soil variables that determined maize productivity in a structurally fragile soil are organic carbon associated with minerals, resistance to penetration and pH. The increase in organic carbon associated with minerals is favored by the increase in calcium content and can reduce penetration resistance and control soil acidity. As for the secondary variables, the soil attributes that dissipate positive and non-negligible correlations with COAM were COT ($r = 0.71$), Ca ($r = 0.49$), silt ($r = 0.42$), T ($r = 0.36$), Mg ($r = 0.35$) and CTC ($r = 0.32$), in the 0-15 cm layer. Among these attributes, only COT ($r = 0.59$) correlated with COAM at a depth of 15-30cm. The soil variable with the highest coefficient of determination with COAM was Ca at depth 0-15 cm and pH as the one with the greatest impact with alteration of the predictor variable. As well as the highest coefficient of determination of RP and pH was with the COAM at a depth of 0-15 cm. The soil variables that determined the maize yield, in a structurally fragile soil, are COAM, RP and pH. The addition of COAM is favored by the increase in Ca contents and can reduce a RP and control soil acidity.

Keywords: Spatial variability, Organic matter, Amazonia in Maranhão.

1 Introdução

Os constantes aumentos na produtividade agrícola ao longo do século XX já se estabilizaram em muitos países (Van Ittersum *et al.*, 2013), ao passo que a demanda mundial por alimentos aumenta 1,07% ao ano (United Nations, 2017), o que torna inevitável a recuperação e produção em solos marginais ou frágeis.

Os solos frágeis representam uma nova fronteira produtiva e ocupam a maior porção da Amazônia maranhense, são solos naturalmente predispostos à fragilidade estrutural, devido ao baixo conteúdo de matéria orgânica, geralmente inferior a 40 g/kg (Rittl *et al.*, 2017; Signor *et al.*, 2018), aos baixos teores de óxidos de ferro e alumínio (Fidalski *et al.*, 2013), alta permeabilidade, susceptibilidade à compactação (Reichert *et al.*, 2016) e baixa capacidade de retenção de cátions (Moura *et al.*, 2018).

Nos municípios da Amazônia Maranhense, a produtividade média de milho não ultrapassa 2 Mg ha⁻¹, em contrapartida, o rendimento médio da cultura no Maranhão é em torno de 4,2 Mg ha⁻¹, ultrapassando 6 Mg ha⁻¹ nos municípios com solos mais argilosos e oriundos de rochas magmáticas, como Balsas, São Raimundo das Mangabeiras, Pastos Bons, Riachão e Loreto (IBGE, 2021). O rendimento da maioria das culturas é influenciado por indicadores físicos e químicos do solo (Usowicz; Lipiec, 2021). Usowicz e Lipiec (2017), ao estudarem a variabilidade espacial dos atributos do solo e produtividade de cereais em um campo cultivado em solo arenoso e com baixo conteúdo de matéria orgânica, observaram que o rendimento dos grãos foi fortemente correlacionado ao conteúdo de água no solo ($r=0,71$) e, mais fracamente, a capacidade de troca catiônica ($r=0,30$) e a densidade do solo ($r=0,28$).

Esta associação entre solo-planta é extremamente complexa, de tal maneira que indicadores isolados não são suficientes para explicar a perda ou o acréscimo dos cultivos de determinado solo, logo a definição de práticas deve ser realizada em função de um conjunto de indicadores específicos (atributos), suas inter-relações e seus efeitos em processos edáficos (Betzek *et al.*, 2017). Por exemplo, os indicadores como textura, densidade do solo, porosidade e estabilidade de agregados estão correlacionados entre si, mas também aos processos hidrológicos complexos como erosão, aeração, escoamento, taxa de infiltração e capacidade de retenção de água (Schoenholtz *et al.*, 2000). A resistência do solo é grandemente dependente do teor de umidade no momento da medição, e para uma interpretação significativa e comparação temporal de dados, deve ser medida com o mesmo teor de umidade (Oliver *et al.*, 2013).

Cassman (1999) relacionou três pilares para a intensificação da produção de cereais:

potencial de produção, qualidade do solo e agricultura de precisão. Nessa perspectiva, a agricultura de precisão ou manejo de sites específicos é utilizado como suporte para identificação da correlação entre a variação espacial e temporal dos atributos do solo e o ganho de produção das lavouras, e mais recentemente, a recuperação da qualidade do solo (Bernardi *et al.*, 2016; Ghosh, *et al.*, 2016). Com as ferramentas da geoestatística é possível calcular a dependência espacial entre as amostras e interpolar valores, em quaisquer posições no campo de estudo, sem tendência e variância mínima. Nesse caso, a krigagem é adequada para o mapeamento da distribuição espacial dos atributos do solo (Betzek *et al.*, 2017) e planejamento da aplicação localizada de insumos, o que possibilita ganhos econômicos e ambientais (Lipiec & Usowicz, 2021).

Nesse contexto, este trabalho parte da hipótese de que os atributos do solo são limitantes a produtividade do milho e que dentro do campo encontram-se diferentes zonas que afetam o desempenho da cultura, o que aumenta o fosso entre a produtividade alcançada e a potencial. Para aproximar a produtividade real e a potencial em região de solo estruturalmente frágil, o primeiro passo deve ser entender quais os atributos do solo que influenciam a produtividade do milho e como essas variáveis interagem com outros atributos do solo?

Por isso, objetivou-se com este trabalho avaliar a correlação entre a variação espacial dos atributos do solo e o rendimento do milho, em solo estruturalmente frágil da Amazônia maranhense.

2 Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido e dem área cultivo de milho, entre novembro e maio, do ano agrícola de 2019/2020, no município de Pindaré Mirim, MA, Brasil. A área amostral está localizada entre as coordenadas geográficas 3° 76' 4.08'' S de latitude, 45° 49' 17.00'' W de longitude e 33 m ao nível do mar, com relevo suave-ondulado (inclinação <5%). O clima da região é do tipo Aw tropical úmido, segundo Köppen (1948), com período chuvoso e seco bem definido e uma precipitação média de 2.100 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).

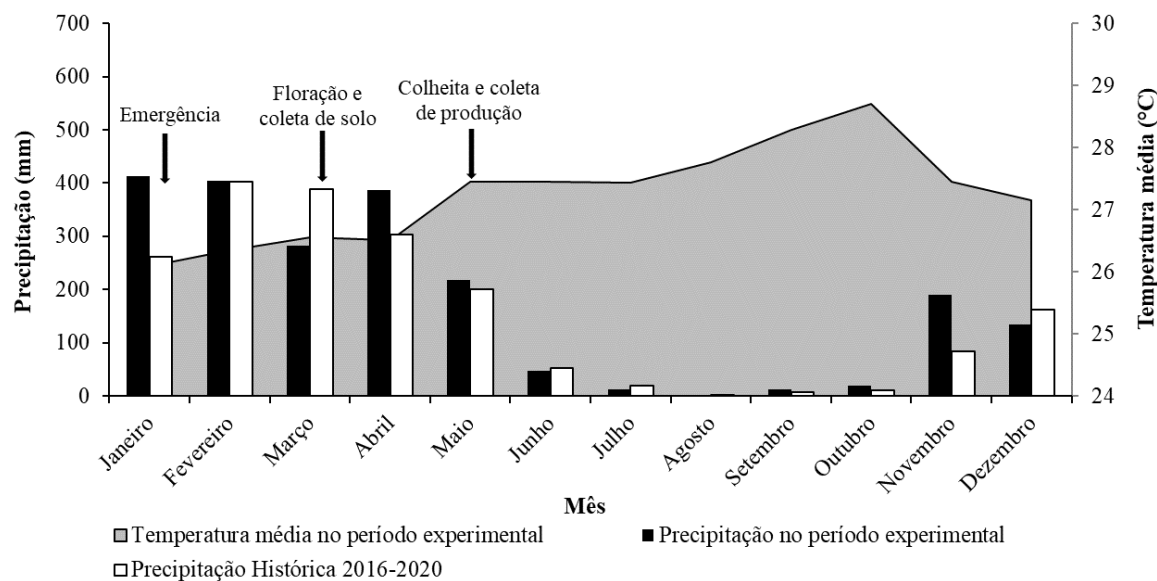


Figura 1. Médias mensais dos dados históricos de precipitação (mm) entre 2016 e 2020 e temperatura média no período experimental da região de Pindaré-Mirim, obtidos juntos à Agência Nacional de Águas e ao Instituto Nacional de Meteorologia, respectivamente.

Geologicamente, o município encontra-se na Formação Itapecuru, formada no Cretáceo Superior (Santos *et al.*, 2018). O solo foi classificado como Plintossolo Argilúvico Distrófico típico (Garcia, 2015), recoberto originalmente por vegetação de Floresta Ombrófila Aberta de Terras Baixas, com predomínio da palmeira babaçu (*Atallea speciosa* Mart.). Antes da implantação do experimento, foi realizada uma coleta de solo para caracterização da composição granulométrica e fertilidade do solo da camada de 0-20 cm, resultando em: pH (H₂O)=5,0; P=1,51 mg dm⁻³; K= 6,0 mmol_c dm⁻³, Na= 0,8 mmol_c dm⁻³, Ca= 32,7 mmol_c dm³, Mg= 53,3 mmol_c dm⁻³, Al=2,2 mmol_c dm⁻³, H+Al= 53,9 mmol_c dm⁻³, V= 63,44% e textura franco arenosa (areia=467,9 g kg⁻¹, silte=366,9 g kg⁻¹ e argila=165,2 g kg⁻¹).

2.2 Condução da lavoura de milho

Para o cultivo de milho foi realizada a substituição da pastagem convencional com *Urochloa brizantha* cv. Marandu após mais de duas décadas do seu estabelecimento. Com base no resultado de análise de solo foram incorporados 1 Mg ha⁻¹ de calcário calcítico e 0,7 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola. Aos 60 dias após a correção do solo, foi realizado o plantio de 2 ha com semente de milho BM709 PRO2 híbrido, tolerante a insetos da ordem Lepidóptera e ao herbicida glifosato. O espaçamento utilizado foi de 0,27 m entre plantas e 0,5 m entre linhas, com a densidade de 72.000 plantas por ha⁻¹. Para a adubação de plantio foram utilizados 370kg ha⁻¹ do formulado 5-25-15 e 120kg ha⁻¹ de N em cobertura com a fonte ureia, quando o milho

possuía sete folhas completamente desenvolvidas. Para o controle de plantas daninhas foram aplicados 3 L ha⁻¹ de glifosato e 5 L ha⁻¹ de atrazina e para o controle de insetos e doenças fúngicas foram utilizados, respectivamente, 130 ml ha⁻¹ de lambda-cialotrina e 200 ml ha⁻¹ azoxistrobina.

2.3 Desenho amostral e coleta dos componentes de produtividade e do solo

Para avaliar as associações do rendimento do milho e atributos do solo foram delimitados 119 pontos de amostragem georreferenciados, em uma grade uniforme de 9 m x 8 m (Figura 2). A área útil correspondeu à 8.568m², acrescida de uma bordadura de 1.432m², totalizando uma área experimental de 10.000m².

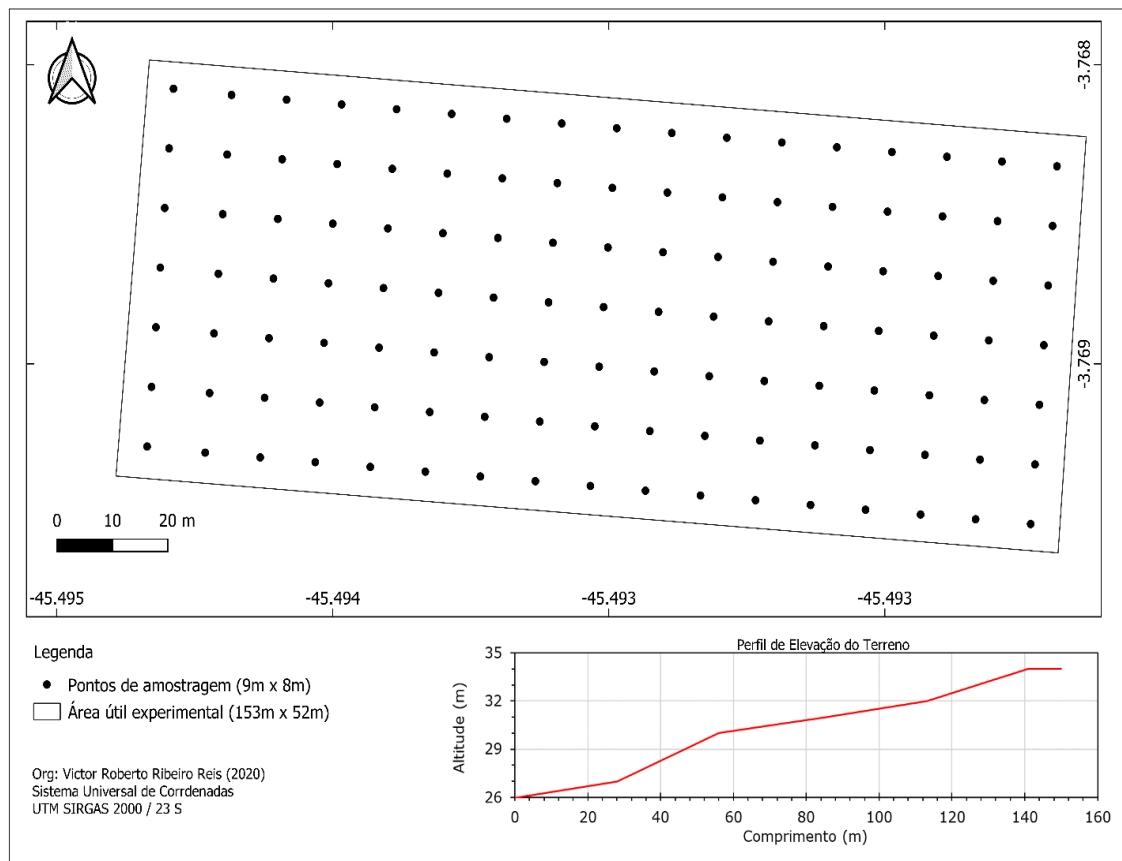


Figura 2. Desenho da área experimental mostrando a distribuição dos pontos de amostragem

O rendimento do milho foi amostrado em 6 m² (3 m x 2 m) ao redor dos pontos de amostragens. Na fase de colheita do milho foram avaliados a produtividade a partir das plantas coletadas em uma área de 6 m² por ponto amostral, número de espigas por planta obtida pela

quantidade média de espigas de 15 plantas, e peso de 100 grãos obtido a partir do peso médio de três repetições de 100 grãos e peso das espigas encontrado pelas relações entre o peso de 100 grãos, número de espigas e produção por ponto.

As amostras de solo foram coletadas durante a floração do milho. Para quantificação dos atributos químicos, composição granulométrica e frações de carbono foram coletadas quatro amostras de solo simples e deformadas por ponto georreferenciado nas profundidades 0-15 e 15-30cm, utilizando-se trado holandês. Em campo, essas amostras simples foram combinadas em uma amostra composta por ponto.

A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada no quarto dia após a chuva, com duas coletas por ponto de amostragem, utilizando o penetrômetro digital Falker®. Simultaneamente, para determinação da umidade do solo, foram coletadas nas profundidades 0-15 e 15-30cm duas amostras deformadas de solo por ponto, com auxílio do trado holandês, e determinada pelo método gravimétrico.

Foi aberta uma trincheira de 30x30x30cm, próxima a cada ponto de amostragem, onde foram coletadas amostras indeformadas de solo em duas profundidades: 0-15 e 15-30 cm, em uma das paredes da trincheira. Para determinação das variáveis densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade foram coletadas amostras em anéis volumétricos de Kopeck com 100 cm³ e 7 cm de diâmetro, fixado perpendicular à trincheira.

2.4 Análises dos atributos do solo

Para a determinação dos atributos físicos do solo foram feitas as seguintes análises, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017): a densidade do solo foi calculada pela expressão: $D_s = m/v$. e

m que: D_s =densidade do solo, expressa em g cm⁻³; m=massa do solo da amostra seca a 105°C até atingir massa constante; e v=volume do anel.

A macroporosidade (com poros maiores que 0,05mm) e a microporosidade (com poros menores que 0,05mm), foram obtidas pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 0,60m e a porosidade total foi calculada divisão da densidade do solo e densidade de partículas (Teixeira et al. 2017). Nesse trabalho considerou-se a densidade de partículas para solos com textura média igual à 2,65g cm⁻³ (Reichardt, 1987).

Após a secagem da terra fina ao ar livre e dispersão em hidróxido de sódio, a composição granulométrica foi obtida pela relação entre os teores de argila (partículas menores que 0,002mm), silte (partículas entre 0,002 e 0,050mm), areia fina (partículas entre 0,050 e

0,200mm) e areia grossa (partículas entre 0,200 e 2,000mm) que foram separadas por tamisação e determinados pelo método da pipeta (Teixeira *et al.*, 2017).

A determinação dos atributos químicos dos solos foram feitas conforme Teixeira *et al.* (2017). O pH em água foi determinado eletronicamente por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão de solo e água na proporção 1:2,5. O cálcio, magnésio e alumínio trocáveis foram extraídos com solução de KCl 1mol L⁻¹. O cálcio e magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e a determinação do Al trocável foi feita por titulação com NaOH 0,025mol L⁻¹.

O fósforo disponível, potássio e sódio trocáveis foram extraídos com solução Mehlich¹ (0,05 mol L⁻¹ de HCl + 0,0125 mol L⁻¹ de H₂SO₄), sendo o fósforo determinado espectroscopicamente por meio da leitura da intensidade da cor do complexo fosfomolibdico produzido pela redução de molibdato com ácido ascórbico; e o potássio e o sódio foram determinados por fotometria de emissão de chama. A acidez potencial (H+Al) foi extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ e determinada por titulação com NaOH 0,025mol L⁻¹. A soma de bases (SB) foi calculada pela soma das concentrações de K, Ca, Mg e Na, a capacidade de troca catiônica (CTC) foi calculada pela soma SB+H+AL e a saturação por bases emregou-se a relação SB/CTC em porcentagem.

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados por digestão úmida com a mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico, sob aquecimento externo, adaptado de Yeomans e Bremner (1988). As amostras de solo de terra fina seca ao ar (TFSA) foram maceradas em gral de porcelana e passadas em peneira de malha de 60 mesh. Para a determinação do teor de C foram pesadas 0,5g de TFSA em tubos de digestão e adicionados 5 ml de K₂Cr₂O₇ 0,167 M e 5,0ml de Ácido Sulfúrico Conc. PA. Nessas mesmas condições foram analisados seis brancos somente com os reagentes, sendo três tubos aquecidos e três não aquecidos. O conjunto de tubos contendo as amostras de solo foi levado para o bloco digestor por 60 minutos, aquecido a 170 °C. Após esse procedimento, as amostras contidas em cada tubo foram transferidas para erlenmayer de 250 ml, usando 80 ml de água destilada. Após esfriar, foram adicionadas três gotas do indicador difenilamina e procedido a titulação com sulfato ferroso amoniacal 0,1M até viragem de cor roxo para verde.

O fracionamento granulométrico da MOS foi realizado segundo Cambardella e Elliott (1992), em que 10 g de TFSA foram submetidas à agitação horizontal por 15 horas na presença de 40 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹). Em seguida, a suspensão foi passada em peneira de 53 µm com o auxílio de jato de água. O material retido na peneira, que consiste no carbono orgânico particulado (COP) associado à fração areia, foi seco em estufa a

60°C, quantificado em relação a sua massa, moído em gral de porcelana e analisado em relação ao teor de carbono orgânico, conforme descrito por Yeomans e Bremner (1988). O material que passou pela peneira de 53µm, que corresponde ao carbono orgânico associado aos minerais (COAM) das frações silte e argila, foi obtido por diferença entre o COT e COP.

2.5 Análise estatística

As análises de dados foram feitas em seis etapas: 1) Estatística descritiva; 2) Testes de normalidade pelo método de Shapiro-Wilk; 3) Correlação de Pearson ($\alpha=0,05$); 4) Análise de regressão múltipla utilizando o método stepwise para escolha das variáveis; 5) Parâmetros do semivariograma e 6) Mapas de isolinhas das variáveis de solo, pelo método de Krigagem Ordinária. Os coeficientes de variação (CV) das variáveis estudadas foram classificados, segundo Warrick e Nielsen (1980), em CV <12% são de baixa variabilidade, entre 12 e 60% de média variabilidade e > 60% de alta variabilidade dos dados.

Foram testados os modelos de semivariogramas: (a) esférico, $\gamma^*(h) = C_0 + C [1,5 (h/a) - 0,5 (h/a)^3]$ para $(0 < h < a)$ e $\gamma^*(h) = C_0 + C$ para $h \geq a$; (b) exponencial, $\gamma^*(h) = C_0 + C [1 - \exp(-3h/a)]$ para $(0 < h < d)$; e (c) gaussiano, $\gamma^*(h) = C_0 + C [1 - \exp(-3h^2/a^2)]$ para $(0 < h < d)$, em que d é a distância máxima na qual o semivariograma é definido. A seleção do modelo ajustado dos semivariogramas foi feita com base na menor soma do quadrado dos resíduos (SQR), no maior coeficiente de determinação (R^2) e maior grau de dependência espacial (GDE). A validação cruzada foi feita para analisar a qualidade do modelo matemático ajustado dos semivariogramas para cada um dos atributos do solo estudado. A interpolação dos valores foi feita pelo método geoestatístico da Krigagem Ordinária, de modo a definir o padrão espacial das variáveis estudadas, o que permitirá a elaboração dos mapas de isolinhas (Paz-González *et al.*, 2000).

As análises descritivas, teste de normalidade e regressão múltipla dos dados foram realizadas utilizando-se o programa R Statistic 3.5.0. As análises geoestatísticas foram realizadas no programa Qgis utilizando o pacote Smartmap.

3 Resultados

3.1 Análise descritiva dos dados

Os resultados dos parâmetros da estatística descritiva dos dados (Tabela 1) foram utilizados como pré-requisito para a realização das análises geoestatísticas. Os valores de média

e mediana para a maioria das variáveis possuem certa aproximação, o que pode indicar uma distribuição simétrica ou próxima à normalidade. Ao comparar esses parâmetros, os teores de Al chamaram atenção, uma vez que as amostras de solo analisadas, de modo geral, não possuem conteúdo do elemento, logo a mediana é semelhante ao valor mínimo.

As variáveis grãos/espiga, peso de 100 grãos e os atributos do solo densidade, porosidade total, areia grossa, areia fina, areia total, pH e V, em ambas camadas avaliadas apresentaram CV na faixa de baixa variabilidade (<12%), enquanto as variáveis, resistência à penetração, macroporosidade, silte, argila e carbono orgânico total apresentaram CV na faixa de média variabilidade (12-60%) em pelo menos uma das profundidades. A RP e os teores de K, COAM, P e Al apresentaram alta variabilidade (>60%) em pelo menos uma das camadas analisadas. O coeficiente de variação das demais variáveis foi classificado como mediano.

Por ser adimensional o coeficiente de variação tem a habilidade de comparar as diferenças entre as variáveis estudadas, ressaltando que os valores elevados de CV podem ser considerados como os primeiros indicadores da existência de heterogeneidade nos dados.

Observa-se que, entre os componentes de produtividade, a quantidade de grãos por espiga, o peso de 100 grãos e a própria produtividade apresentaram distribuição normal ($p > 0,05$), em contrapartida, o número de espigas m^{-2} afastou-se da normalidade ($p < 0,05$).

A curva de tendência dos atributos densidade, porosidade total, silte, areia fina e areia total, na camada 0-15 cm, pode ser representada por uma distribuição normal. Entre os atributos físicos, na camada 15-30 cm, apenas os dados de microporosidade, areia fina e areia total estavam dentro da normalidade.

Os atributos químicos que apresentaram normalidade foram COP, Ca, Mg, H+Al, T, CTC e V até 15 cm de profundidade. Dentre esses atributos, apenas os dados de COP afastaram-se da curva de normalidade.

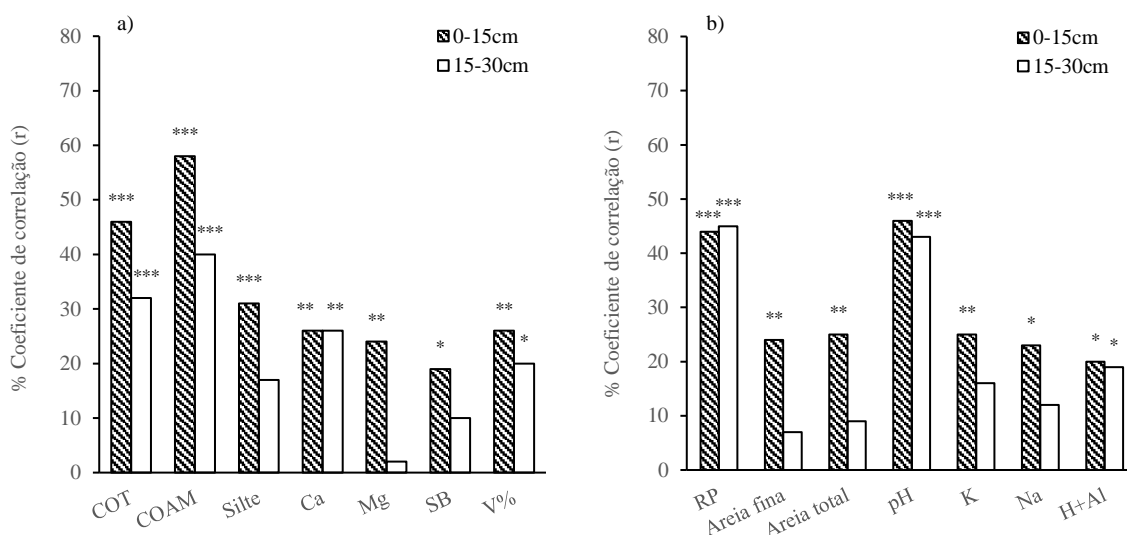
Tabela 1. Parâmetros da estatística descritiva dos atributos do solo e componentes de produtividade do milho em região de solo estruturalmente frágil.

Componentes de produção	Min.	Máx.	Média	Mediana	Variância	DP	CV (%)	Curtose	p (S-Wilk)
N. de espiga m ⁻²	4,16	8,32	5,57	5,43	0,63	0,79	14,27	0,55	<0,0001
Grãos/espiga	288,00	508,80	407,93	408,89	1277,11	35,74	8,76	1,13	0,1563
Peso de 100 grãos (g)	15,91	25,85	20,69	20,54	5,14	2,27	10,95	-0,49	0,0467
Produtividade (Mg ha ⁻¹)	2,96	7,59	4,68	4,66	0,67	0,82	17,50	0,82	0,2317
Atributos físicos do solo					0-15 cm				
RP (Mpa)	0,19	3,62	0,75	0,60	0,31	0,55	73,28	9,04	<0,0001
Densidade (g cm ⁻³)	1,22	1,75	1,46	1,45	0,01	0,09	6,40	0,67	0,2880
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,03	0,28	0,11	0,10	0,00	0,04	33,70	4,78	<0,0001
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	4,16	8,32	5,57	5,43	0,63	0,79	14,27	0,55	0,0062
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,34	0,54	0,45	0,45	0,00	0,04	7,78	0,73	0,2164
Areia grossa (g Kg ⁻¹)	48,50	64,00	52,93	52,50	6,42	2,53	4,79	6,26	<0,0001
Areia fina (g Kg ⁻¹)	507,50	711,50	603,99	599,50	1596,45	39,96	6,62	0,27	0,3543
Silte (g Kg ⁻¹)	117,00	337,62	234,15	232,50	1525,42	39,06	16,68	0,79	0,1346
Argila (g Kg ⁻¹)	51,00	150,00	112,48	110,00	302,50	17,39	15,46	0,66	0,0005
Areia total (g Kg ⁻¹)	563,50	763,23	656,92	652,50	1577,34	39,72	6,05	0,34	0,1754
Atributos químicos do solo					0-15 cm				
COT (g Kg ⁻¹)	3,89	20,33	11,02	10,43	10,47	3,24	29,35	0,79	0,0030
COP (g Kg ⁻¹)	0,26	12,72	5,55	5,63	5,72	2,39	43,07	0,12	0,5506
COAM (g Kg ⁻¹)	0,46	16,26	5,47	4,91	9,36	3,06	55,92	0,76	0,0102
pH	3,40	5,60	4,28	4,28	0,11	0,33	7,64	1,95	0,0130
P (mg dm ⁻³)	2,10	23,10	9,08	8,30	16,51	4,06	44,76	0,23	0,0065
K (mmol _c dm ⁻³)	1,99	34,63	5,02	4,41	14,32	3,78	75,41	38,51	<0,0001
Ca (mmol _c dm ⁻³)	10,00	52,00	27,93	28,00	65,92	8,12	29,07	-0,22	0,7512
Mg (mmol _c dm ⁻³)	11,00	46,50	25,79	24,94	51,40	7,17	27,80	-0,36	0,2434
Al (mmol _c dm ⁻³)	0,00	20,00	1,51	0,00	8,86	2,98	197,29	17,73	<0,0001
Na (mmol _c dm ⁻³)	0,83	17,64	3,07	2,83	3,55	1,88	61,27	34,83	<0,0001

H+Al (mmol _c dm ⁻³)	8,41	28,84	17,99	18,10	18,41	4,29	23,84	0,03	0,4167
T (mmol _c dm ⁻³)	31,11	99,27	61,80	62,15	176,69	13,29	21,51	-0,14	0,5224
CTC (mmol _c dm ⁻³)	43,52	118,85	79,80	79,53	186,03	13,64	17,09	-0,05	0,9000
V (%)	59,85	90,80	76,97	77,43	36,52	6,04	7,85	-0,07	0,8415
Atributos físicos do solo					15-30 cm				
RP (Mpa)	0,47	4,65	1,49	1,41	0,59	0,77	51,45	6,52	<0,0001
Densidade (g cm ⁻³)	1,26	1,64	1,50	1,50	0,00	0,07	4,72	1,26	0,0017
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,07	0,21	0,12	0,12	0,00	0,03	21,79	1,27	0,0047
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,19	0,39	0,32	0,32	0,00	0,04	11,57	0,86	0,0704
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,38	0,52	0,43	0,43	0,00	0,03	6,13	1,26	0,0017
Areia grossa (g Kg ⁻¹)	50,00	61,00	52,70	52,00	4,97	2,23	4,23	2,46	<0,0001
Areia fina (g Kg ⁻¹)	489,00	716,50	605,35	610,00	1670,91	40,88	6,75	0,56	0,2502
Silte (g Kg ⁻¹)	139,50	371,64	223,23	220,75	1411,11	37,56	16,83	4,36	<0,0001
Argila (g Kg ⁻¹)	50,00	170,00	119,87	120,00	429,01	20,71	17,28	0,18	0,0123
Areia total (g Kg ⁻¹)	539,00	767,00	658,54	663,00	1697,00	41,19	6,26	0,76	0,0820
Atributos químicos do solo					15-30 cm				
COT (g Kg ⁻¹)	1,16	17,27	6,59	6,69	7,20	2,68	40,74	2,53	0,0004
COP (g Kg ⁻¹)	0,02	9,63	3,67	3,62	5,12	2,26	61,76	-0,68	0,0168
COAM (g Kg ⁻¹)	0,02	11,33	2,92	2,45	4,82	2,20	75,17	1,60	<0,0001
pH	2,28	5,45	4,24	4,30	0,17	0,41	9,71	6,38	<0,0001
P (mg dm ⁻³)	1,80	32,60	6,52	4,10	33,56	5,79	88,86	4,71	<0,0001
K (mmol _c dm ⁻³)	2,03	24,10	4,67	4,45	4,55	2,13	45,65	58,91	<0,0001
Ca (mmol _c dm ⁻³)	10,00	40,67	25,20	25,00	41,71	6,46	25,63	-0,54	0,5937
Mg (mmol _c dm ⁻³)	6,00	51,00	26,53	25,77	96,98	9,85	37,11	-0,62	0,1676
Al (mmol _c dm ⁻³)	0,00	12,00	1,92	0,00	8,36	2,89	150,70	2,30	<0,0001
Na (mmol _c dm ⁻³)	0,00	11,52	2,83	2,83	1,26	1,12	39,72	30,57	<0,0001
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	9,04	28,21	17,85	17,89	12,55	3,54	19,84	0,53	0,1173
T (mmol _c dm ⁻³)	31,91	98,63	59,23	58,16	198,87	14,10	23,81	-0,75	0,0328
CTC (mmol _c dm ⁻³)	49,43	118,83	77,09	75,62	217,93	14,76	19,15	-0,66	0,0856
V (%)	61,98	87,93	76,26	76,62	31,10	5,58	7,31	-0,58	0,0627

3.2 Determinação das variáveis preditoras

A maioria das correlações lineares simples e significativas apresentaram um fraco coeficiente de correlação ($r < 0,30$) (Figura 3). Os atributos do solo que foram diretamente proporcionais à produtividade do milho foram o COAM ($r=0,58$), COT ($r=0,46$) e silte ($r=0,31$), na camada 0-15 cm (Figura 3-a). Entre esses atributos, apenas COT ($r=0,32$) e COAM ($r=0,40$) se correlacionaram positivamente com a produtividade na camada inferior. A RP ($r=0,44$ e $r=0,45$) e pH ($r=0,46$ e $r=0,43$) foram inversamente proporcionais com a produtividade, em ambas camadas (Figura 3-b).



Nota: *, **, ***, correlação significativa ($p < 0,05$); muito significativa ($p < 0,01$) e extremamente significativo ($p < 0,001$), respectivamente.

Figura 3. Coeficientes de correlação de Pearson entre produtividade de milho e os atributos do solo nas camadas de 0-15 e 15-30 cm: a) relação diretamente proporcional; b) relação inversamente proporcional.

O modelo de regressão linear múltipla e o método stepwise indicaram que os mesmos atributos do solo foram capazes de explicar as variações na produtividade do milho nas duas profundidades (Tabela 2). A combinação entre COAM, RP e pH foi capaz de explicar 44% da variação na produtividade do milho na camada 0-15 cm e 39% na camada 15-30cm.

O COAM apresentou valor mínimo de $0,46 \text{ g kg}^{-1}$ e máximo de $5,66 \text{ g kg}^{-1}$ na camada superficial e variou entre $0,02$ e $5,12 \text{ g kg}^{-1}$ na camada subsuperficial (Tabela 1). Assim, à medida que aumentamos 1 g kg^{-1} de COAM do solo na camada 0-15 cm, acrescentamos 110 kg à produção de milho por hectare (Tabela 2). A contribuição é semelhante na camada 15-30 cm, com acréscimo de 112 kg de milho ha^{-1} , quando aumentamos uma g kg^{-1} de COAM.

O pH variou entre 3,0 e 5,6 na camada 0-15 cm e entre 2,8 e 5,45 na camada 15-30 cm (Tabela 1), sendo que para o intervalo de pH avaliado, a produtividade aumenta 603 kg à medida que o pH fica uma unidade mais baixa (Tabela 2). Na camada inferior, essa relação diminui para 574 kg para a mesma variação no pH.

A resistência à penetração variou entre 0,19 e 3,63 Mpa na camada 0-15 cm e entre 0,49 e 4,65 na camada 15-30 cm (Tabela 1). Assim, à medida que a resistência à penetração aumentou 1 Mpa nas camadas 0-15 cm e 15-30 cm, a produtividade decresceu 326 kg ha⁻¹ e 341 kg ha⁻¹ para as respectivas camadas (Tabela 2)..

Tabela 2. Análise da estimativa dos parâmetros da regressão linear múltipla stepwise entre a produtividade do milho e os atributos do solo nas camadas 0-15 e 15-30 cm.

Variáveis	Coefficiente de regressão	Erro padrão	t	Pr(> t)
0-15 cm				
Intercepto	6,3399	1,3059	-4,885	0,0000
COAM	0,1105	0,0205	5,384	0,0000
RP	-0,3264	0,1124	-2,903	0,0044
pH	-0,6038	0,1717	-3,516	0,0006
GL=115; Erro padrão residual=0,6121; R ² =0,4556; F=32,07; p<0,0001				
15-30 cm				
Intercepto	4,2180	0,9019	-5,378	0,0000
COAM	0,1120	0,0277	4,042	0,0007
RP	-0,3413	0,0813	-4,198	0,0001
pH	-0,5744	0,1508	-3,808	0,0000
GL=115; Erro padrão residual=0,6449; R ² =0,3955; F=25,08; p<0,0001				

Ao examinar os semivariogramas experimentais das variáveis preditoras observa-se que todas possuem a dependência espacial moderada (>75%) e a natureza da variação dos dados foi do tipo isotrópica (Tabela 3). Na camada 0-15 cm, o alcance dos dados foram de 621, 388 e 313 m para RP, COAM e pH, respectivamente. Na camada subjacente, o alcance foi de 476, 410 e 197 m para RP, pH e COAM.

O modelo matemático exponencial foi o que melhor se ajustou para a explicação da variação espacial da produtividade do milho, enquanto que para COAM e RP o melhor modelo foi o esférico e para RP, o gaussiano (Tabela 3). O percentual do coeficiente de determinação (R²) dos modelos ajustados para produtividade foi de 87% e para COAM, RP e pH foram, respectivamente, de 84%, 66%, 88%, na camada 0-15cm e 74%, 84%, 96%, na camada 0-15cm.

Tabela 3. Parâmetros do semivariograma ajustados para produtividade, COAM, RP e pH do solo nas profundidades 0-15 e 15-30 cm.

Variáveis	Modelo	Co	Co+C	a (m)	r ²	CV	GDE (%)	Classe
PROD	Exponencial	0,52	0,71	531	0,87	0,90	74	Moderada
0-15cm								
COAM	Esférico	6,90	10,16	388	0,84	0,85	68	Moderada
RP	Gaussiano	242,14	341,05	621	0,66	0,69	71	Moderada
pH	Esférico	0,09	0,13	313	0,88	0,90	73	Moderada
15-30cm								
COAM	Esférico	2,99	4,86	197	0,74	0,79	62	Moderada
RP	Gaussiano	393,5	590,0	476	0,84	0,85	67	Moderada
pH	Esférico	0,11	0,18	410	0,96	0,97	61	Moderada

Os mapas de classificação das variáveis predictoras e a produtividade do milho foram preparados como uma série de contornos coloridos (Figura 4). No geral, observamos que as menores produtividades se encontram principalmente nas porções mais ao norte e ao sul, em direção às extremidades do campo experimental. Essas porções também corresponderam aos menores teores de COAM e os maiores valores de RP e pH, na camada 0-15 cm.

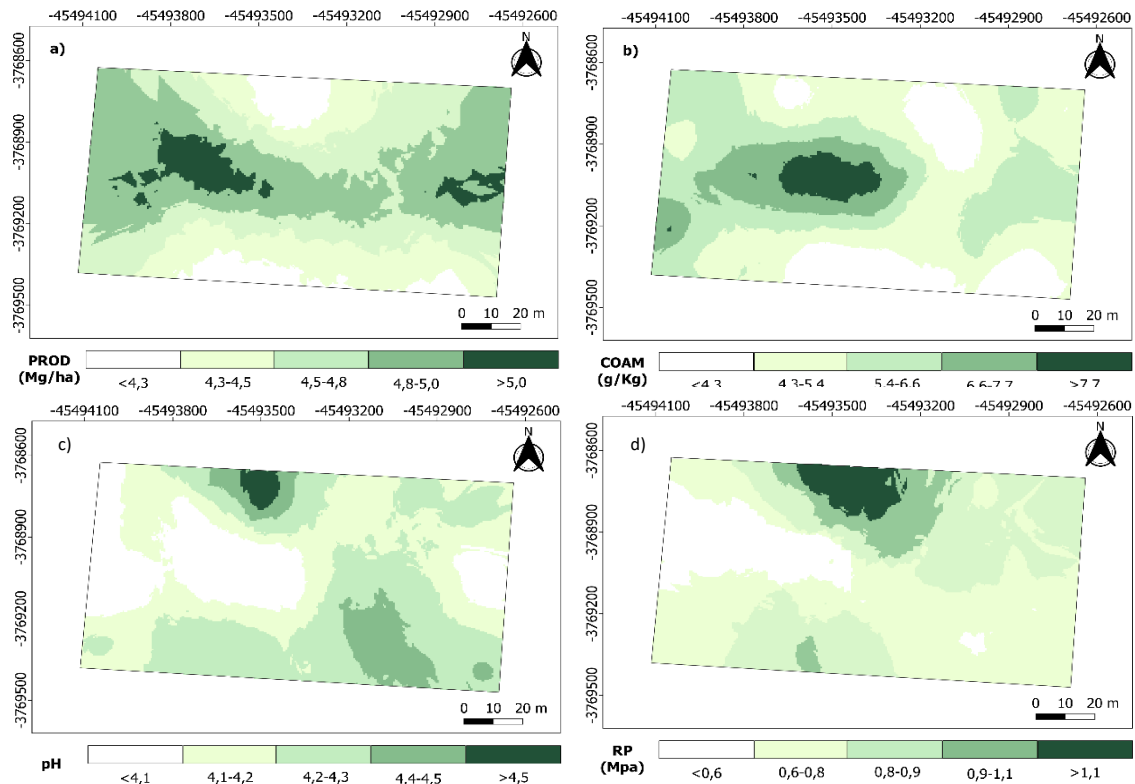


Figura 4. Distribuição espacial da produtividade do milho e suas variáveis predictoras na profundidade 0-15 cm: a) Produtividade do milho, b) COAM, c) pH e d) RP.

Na profundidade 15-30 cm, quando comparada com a camada superficial, as variáveis predictoras possuíram menor correspondência visual com produtividade do milho, com exceção da resistência à penetração que tornou ainda mais evidente a sua associação com a variável dependente (Figura 5).

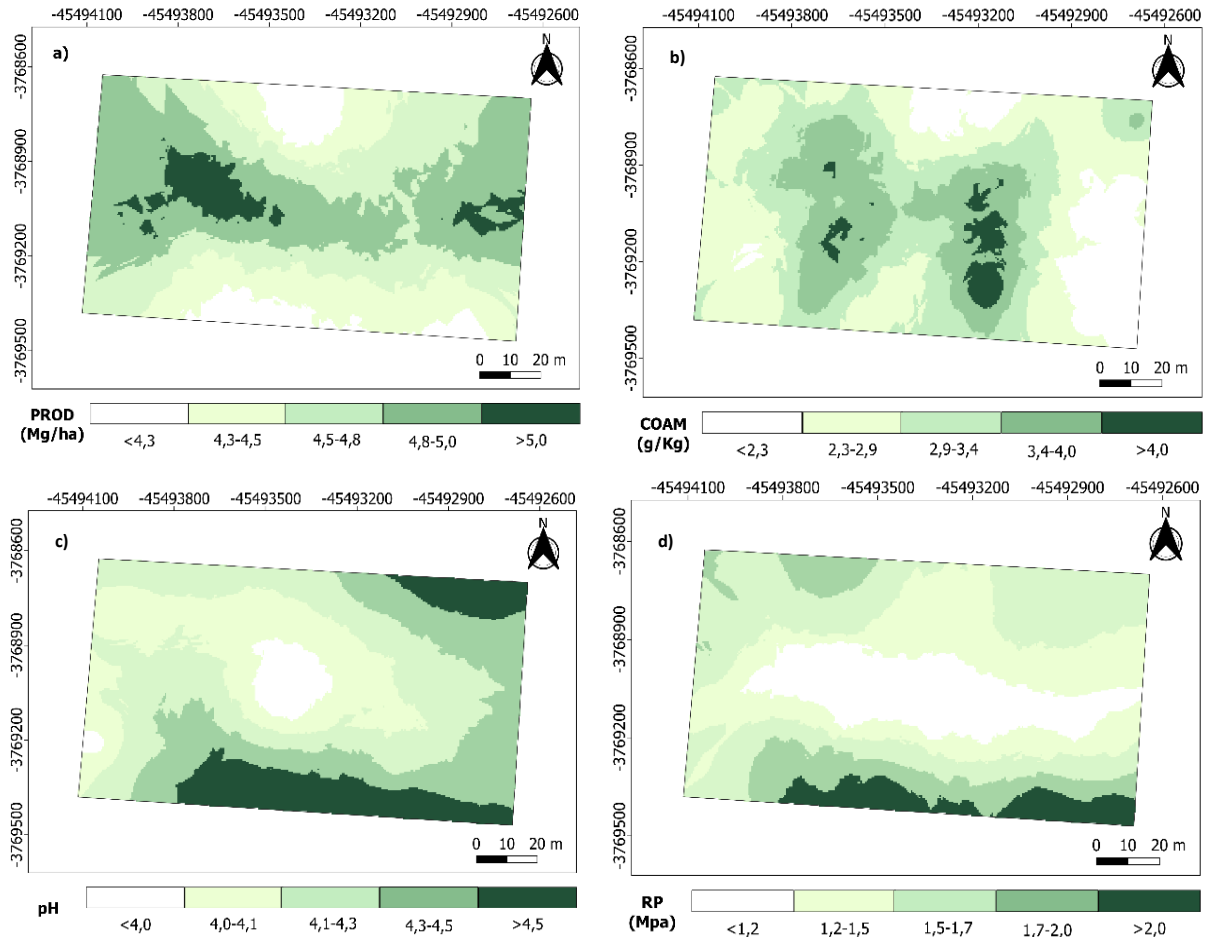
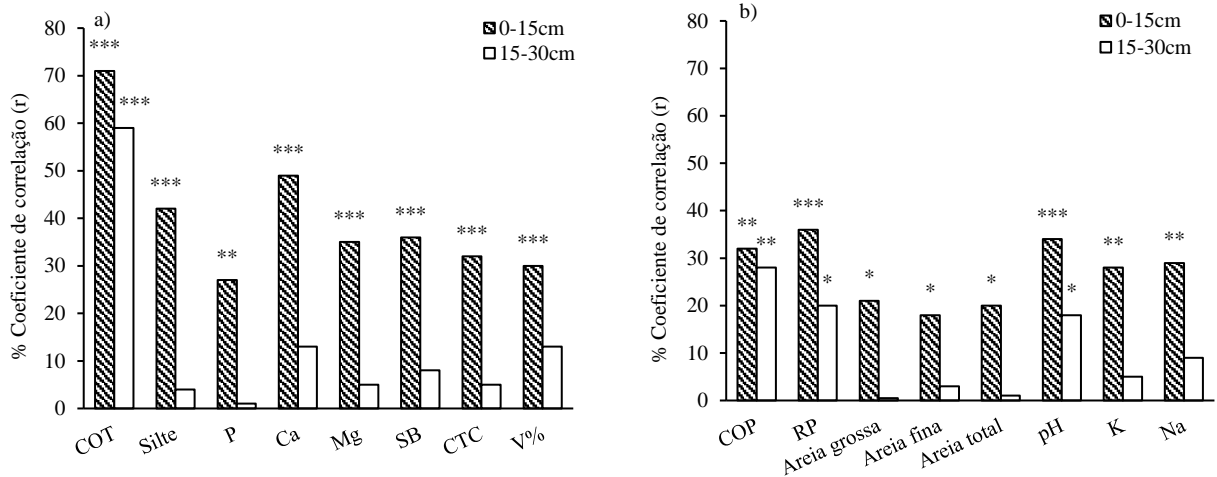


Figura 5. Distribuição espacial da produtividade do milho e suas variáveis predictoras na profundidade 15-30 cm: a) Produtividade do milho, b) COAM, c) pH e d) RP.

3.3 Indetificação das variáveis secundárias

No geral, as correlações lineares simples entre as variáveis independentes do solo com a variável dependente de COAM apresentaram coeficiente de correlação moderado ($r=0,30-0,50$) na profundidade 0-15 cm (Figura 6). Os atributos do solo que apresentaram correlações positivas com o COAM foram o COT ($r=0,71$), Ca ($r=0,49$), silte ($r=0,42$), SB ($r=0,36$), Mg ($r=0,35$) e CTC ($r=0,32$), na camada 0-15cm. Entre esses atributos, apenas o COT ($r=0,59$) se correlacionou com o COAM na profundidade 15-30cm.

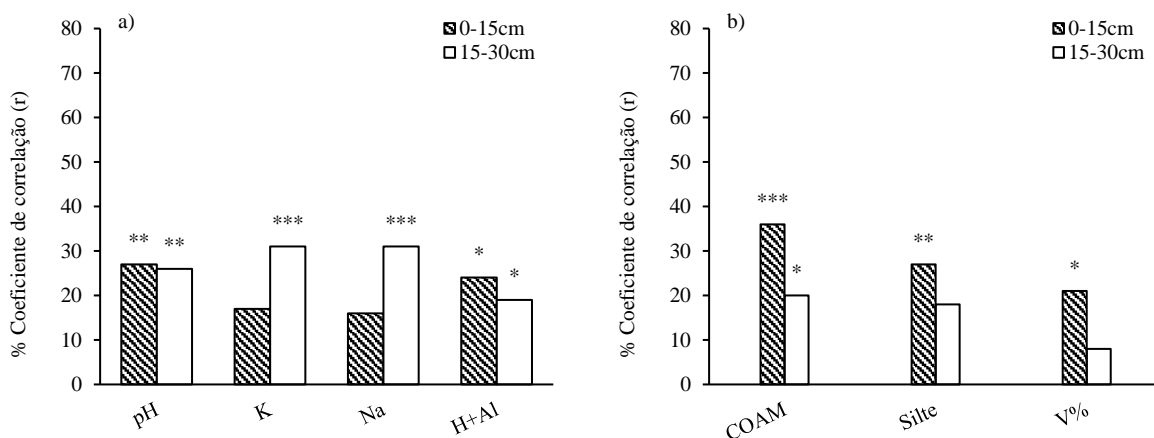
Em contrapartida, RP (0,36), pH (0,34), COP (0,32) correlacionaram-se negativamente com o COAM, na camada 0-15 cm (Figura 6). Na profundidade subsuperficial não houve correlação significativa e inversamente proporcional superior à 30%.



Nota: *, **, ***, correlação significativa ($p < 0,05$); muito significativa ($p < 0,01$) e extremamente significativa ($p < 0,001$), respectivamente.

Figura 6. Coeficientes de correlação de Pearson entre carbono associado aos minerais e os atributos do solo nas camadas de 0-15 e 15-30 cm: a) relação diretamente proporcional; b) relação inversamente proporcional.

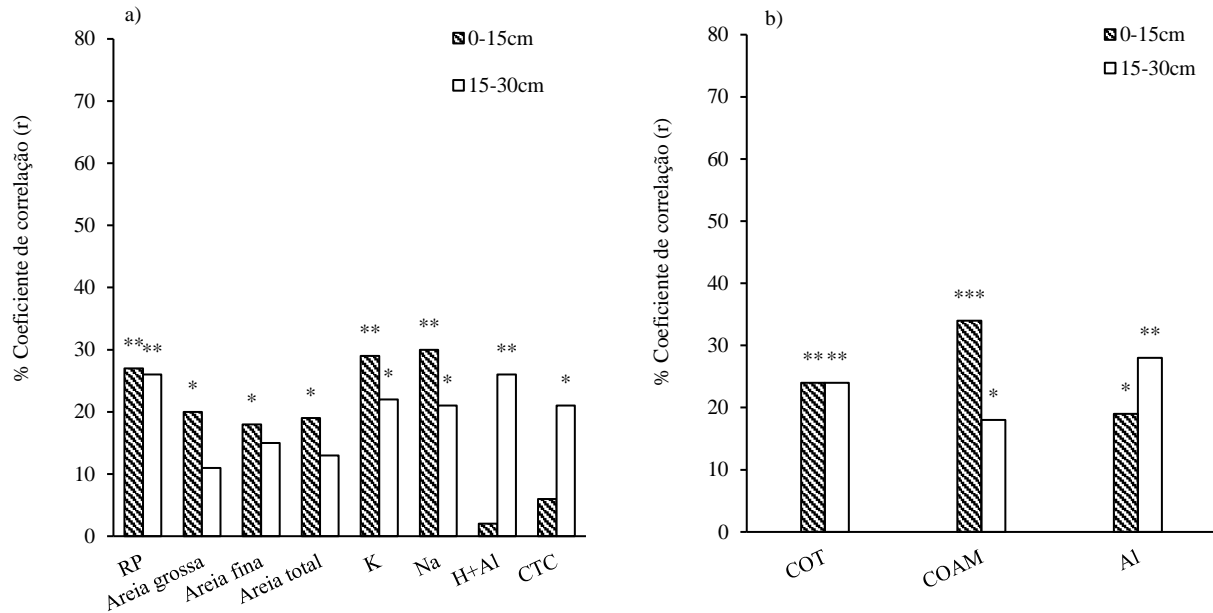
No geral, as correlações lineares simples entre as variáveis independentes do solo com a variável dependente RP, apresentaram coeficiente de correlação desprezível ($r < 0,30$) em ambas camadas, com exceção dos atributos do solo H+Al ($r = 0,49$), K ($r = 0,31$) e Na ($r = 0,31$), que correlacionaram-se positivamente na camada 0-15cm e COAM ($r = 0,36$) na camada 15-30 cm (Figura 7).



Nota: *, **, ***, correlação significativa ($p < 0,05$); muito significativa ($p < 0,01$) e extremamente significativa ($p < 0,001$), respectivamente.

Figura 7. Coeficientes de correlação de Pearson entre resistência à penetração e os atributos do solo nas camadas de 0-15 e 15-30 m: a) relação diretamente proporcional; b) relação inversamente proporcional.

No geral, as correlações lineares simples entre as variáveis independentes do solo com a variável dependente de pH apresentaram coeficiente de correlação desprezível ($r < 0,30$) em ambas camadas, com exceção do COAM ($r = 0,34$) que apresentou correlação negativa na camada 0-15 cm (Figura 8).



Nota: *, **, ***, correlação significativa ($p < 0,05$); muito significativa ($p < 0,01$) e extremamente significativo ($p < 0,001$), respectivamente.

Figura 8. Coeficientes de correlação de Pearson entre pH e os atributos do solo nas camadas de 0-15 e 15-30 cm: a) relação diretamente proporcional; b) relação inversamente proporcional.

O modelo de regressão linear múltipla e o método stepwise (Tabela 4) indicaram que a combinação entre RP, areia grossa, silte, pH, Ca e COP foi capaz de explicar 50% dos valores de COAM na camada 0-15 cm e, entre essas variáveis RP, pH e COP explicaram apenas 16% na camada 15-30cm.

Para RP, a combinação entre COAM, Silte e pH foi capaz de explicar 17% dos valores de COAM na camada 0-15cm e 14% na camada 15-30 cm. E entre as preditoras, o pH foi 23% explicado pelas variáveis COAM, areia grossa, areia fina, RP, Al e K na camada 0-15 cm e 22% pela combinação de COAM, Al, H+Al e K na camada inferior.

Tabela 4. Análise da estimativa dos parâmetros da regressão múltipla stepwise entre a carbono orgânico associado aos minerais, resistência à penetração e pH e os atributos do solo nas camadas 0-15 e 15-30cm.

Variáveis		Coeficiente de regressão	Erro padrão	T	Pr(> t)	R ²
Preditoras	Secundárias					
0-15cm						
COAM	Intercepto	-11,8654	5,8675	-2,022	0,0455	-
	RP	-0,7276	0,4065	-1,790	0,0761	0,13
	Areia grossa	-0,2077	0,0831	-2,499	0,0139	0,04
	Silte	0,0226	0,0056	4,012	0,0001	0,18
	pH	-1,7414	0,6103	-2,853	0,0052	0,12
	Ca	0,1483	0,0255	5,806	0,0000	0,24
	COP	-0,1759	0,0896	-1,963	0,0521	0,10
GL=112; Erro padrão residual=2,207; R ² =0,5059; F=19,11; p<0,0001						
RP	Intercepto	2,0412	1,1036	1,850	0,0669	-
	COAM	-0,0434	0,0175	-2,471	0,0149	0,16
	Silte	-0,0020	0,0013	-1,569	0,1195	0,07
	pH	0,2629	0,1389	1,892	0,0610	0,07
GL=115; Erro padrão residual=50,2; R ² =0,1738; F=8,067; p<0,0001						
pH	Intercepto	8,4297	0,4038	20,872	0,0000	-
	COAM	-0,0286	0,0104	-2,740	0,0071	0,16
	Areia grossa	0,0215	0,0121	1,776	0,0783	0,04
	K	0,0202	0,0082	2,450	0,0158	0,08
GL=115; Erro padrão residual=0,3253; R ² =0,1775; F=8,273; p<0,0001						
15-30cm						
COAM	Intercepto	-3,6072	2,8475	-1,267	0,2078	-
	RP	-0,5668	0,2567	-2,208	0,0292	0,04
	pH	-0,9254	0,4749	-1,949	0,0537	0,03
	COP	-0,3181	0,0842	-3,775	0,0002	0,08
GL=115; Erro padrão residual=2,047; R ² =0,1628; F=7,455; p<0,0001						
RP	Intercepto	2,6205	1,0329	2,537	0,0125	-
	COAM	-0,0526	0,0310	-1,694	0,0930	0,04
	Silte	-0,0028	0,0018	-1,574	0,1182	0,03
	pH	0,3916	0,1681	2,329	0,0216	0,07
GL=115; Erro padrão residual=0,7317; R ² =0,1092; F=4,701; p=0,0039						
pH	Intercepto	-6,4464	0,1374	-46,912	0,0000	-
	COAM	-0,0269	0,0156	-1,725	0,0871	0,03
	Al	-0,0447	0,0120	-3,701	0,0003	0,08
	H+Al	0,0324	0,0099	3,271	0,0014	0,07
	K	0,0296	0,0162	1,835	0,0691	0,05
GL=114; Erro padrão residual=0,3699; R ² =0,2211; F=8,09; p<0,0001						

A variável do solo que apresentou maior coeficiente de determinação com o COAM foi o Ca na profundidade 0-15cm e o pH como aquela que apresenta maior impacto na variação do atributo preditor (Figura 9), ou seja, à medida que aumentamos 1 mmol_c dm⁻³ de Ca no solo na camada 0-15cm, incrementamos 0,15 g kg⁻¹ de COAM. O pH, por sua vez, impacta

negativamente a variável preditora, à medida que o solo fica uma unidade menos ácido, o COAM diminui em $1,74 \text{ g kg}^{-1}$.

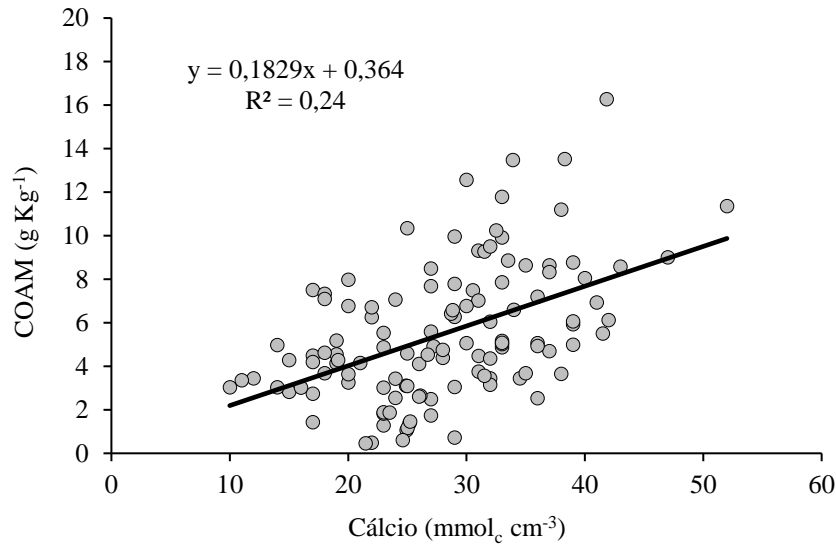


Figura 9. Dispersão dos dados do COAM em relação aos teores de cálcio no solo, na camada 0-15 cm.

O maior coeficiente de determinação da RP e pH foi com o COAM na profundidade 0-15 cm (Figura 10). Assim, à medida que aumentamos 1 g kg^{-1} de COAM no solo na camada 0-15cm, diminuímos em $0,4 \text{ Mpa}$ na resistência do solo. De maneira análoga o aumento em 1 g kg^{-1} de COAM ocasionou uma aumento de 2 % na acidez do solo.

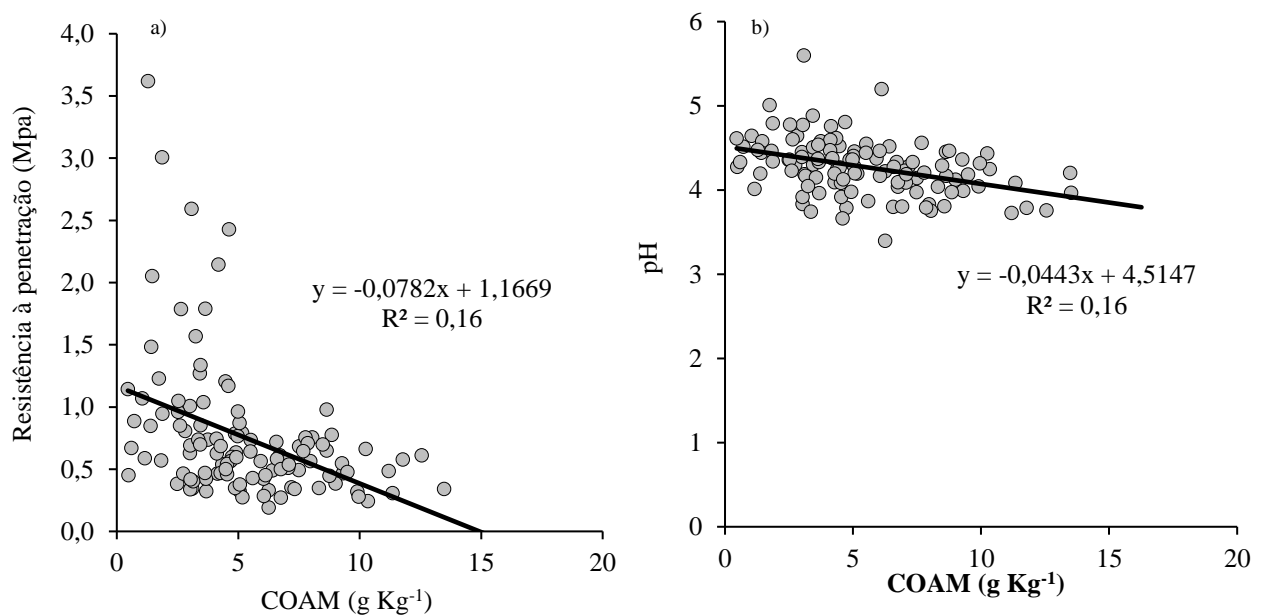


Figura 10. Dispersão dos dados da variável preditora e variável secundária: a) Resistência a penetração e COAM, e b) pH e COAM, na camada 0-15 cm.

4 Discussão

Segundo Swallow (1978), quando os valores da média e mediana são semelhantes, os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal. Embora tenha ocorrido a distribuição não-normal para algumas das variáveis, em especial as preditoras, isso não foi um problema para utilização da krigagem ordinária. Estes resultados reforçam relatos anteriores de que na geoestatística os dados não precisam ser normais, contudo, quando ocorre a normalidade, o ajuste do semivariograma tende a ser mais próximo do modelo matemático (Oliver & Webster, 2014).

Essa ocorrência de dados não normais de algumas variáveis, pode ser atribuída a heterogeneidade intrínseca do solo, devido ao material de origem, intemperização, erros na amostragem ou a heterogeneidade da área de estudo, causada pelo manejo anterior à instalação do experimento que promove a alteração do solo.

Ao determinarmos as variáveis preditoras, encontramos COAM, RP e pH, em ambas profundidades, como os atributos que explicam até 44% da variação da produtividade alcançada na área de estudo. Este pode ser considerado um bom resultado, já que a produtividade dependente de outros fatores ambientais como dominância de plantas espontâneas, variação no microclima, material genético e ataque de pragas e doenças.

Além disso, globalmente, ao isolarmos o fator nutricional, temos a restrição na absorção de água e nitrogênio pelas raízes das plantas, como o principal limitador da produção das culturas (Mueller *et al.*, 2012). Nesse sentido, é importante entendermos como as três variáveis preditoras e suas interações influenciam na oferta de água e nutrientes em solos tropicais.

Nos solos tropicais, a matéria orgânica se constitui como o único agente cimentante, de tal maneira, que após o aumento nos teores de carbono no solo, ocorre o aumento da área de superfície específica das partículas, o que pode resultar em um aumento da capacidade de retenção de água (Khdair *et al.*, 2019). Os teores de carbono são diretamente proporcionais a quantidade de moléculas de água em torno das partículas do solo (Silva *et al.*, 2016), como efeito ocorre maior agregação, estabilidade dos agregados do solo e espaço total dos poros, o que geralmente leva à redução da coesão e da resistência ao crescimento das raízes (Tarkiewicz & Nosalewicz, 2005).

Por isso, a melhoria dos atributos físicos do solo, como resistência à penetração ou porosidade total provocadas pelo aumento da matéria orgânica parece ter uma forte relação causal com a anatomia, morfologia, densidade e fisiologia das raízes, e conseqüentemente com

o crescimento e a produtividade do milho (Centenaro *et al.*, 2018). Outro papel importante da matéria orgânica do solo é a liberação de nutrientes durante a sua decomposição, particularmente nitrogênio, fósforo e enxofre. A capacidade de troca catiônica também é aumentada, com o consequente aumento da retenção de cátions.

Portanto, nas circunstâncias desse experimento, o aumento da densidade radicular em profundidade pode ter sido responsável pela diminuição do stress das plantas (Alameda & Villar, 2012). Evidentemente, isso só é possível se forem melhoradas as propriedades físicas do solo. De fato, a diminuição da resistência do solo à penetração das raízes, associada ao aumento da matéria orgânica, pode ser considerada a principal responsável pelo incremento médio de 320 kg de milho ha⁻¹ Mpa⁻¹ (Tabela 2), o que pode gerar um acréscimo na receita do produtor de até USD 81,45 ha⁻¹, se considerarmos o preço médio da saca de milho na região no dia 27/07/2021 igual à USD 15,30 (USD 1,00=R\$ 5,23) .

Ao analisarmos a resposta da produtividade à variação no pH, fica evidente a insuficiência do conceito mineralista para expressar a fertilidade do solo, hipótese que foi muito bem descrita por Nicolodi *et al.* (2008). Esses autores concluíram que as altas produtividades podem ser obtidas em solos cultivados por longo tempo no SPD na presença de valores pH muito baixos. Ao transferirmos para nossa realidade, uma região de solos estruturalmente frágeis com faixa de pH que varia entre 3 e 5, e em que a MOS se consolida como o principal atributo modificador da produtividade, o pH teria mais relação com a decomposição da MOS do que com a produtividade das culturas propriamente dita.

Segundo Helyar e Porter (1989), entre outras causas da acidificação do solo, justificam-se os resultados desse estudo, através de dois fatores: 1) o processo de liberação de H⁺ pelas raízes através do equilíbrio eletrostático com os cátions da MOS e, concomitantemente, 2) a dissociação dos seus grupos carboxilícos e fenólicos através da decomposição da MOS. Outro fator importante é o efeito do pH na atividade dos microorganismos decompositores, que em áreas predominantemente mais ácidas, os fungos e as bactérias são mais ativos (Malik *et al.*, 2018).

Outro resultado que destaca-se é a contribuição do COAM na composição do COT. Neste estudo, na superfície do solo, o COAM influenciou o COT 1,6 vezes mais do que o COP, já na camada subjacente, o COAM influenciou praticamente, tanto quanto o COP (Apêndice A e B). Na verdade, mais importante do que descrevermos essa relação entre COAM/COP, é compreendermos que o aumento no conteúdo da matéria orgânica é tão importante para garantir a produtividade das culturas, quanto o aumento da sua persistência no solo. Assim, o processo

de decomposição da biomassa e os mecanismos de estabilização da MOS devem ser favorecidos de forma integrada, visando garantir a liberação de nutrientes e a sustentabilidade da produção das culturas.

O processo de decomposição deriva da interação entre decompositores e qualidade química da biomassa. O metabolismo, perpetuação e diversidade dos primeiros já são altamente favorecidos nas condições climáticas tropicais; por sua vez, a qualidade da biomassa é dependente dos teores de C, N, relação C / N, lignina e de polifenóis (Puttaso *et al.*, 2013). Assim, a biomassa de alta qualidade possui baixos teores desses componentes, com exceção do N, pois esse é mineralizado, ou seja, tornando-o disponível para absorção pelas plantas.

Neste estudo a fração estável da MOS está representada pelo COAM, e entre os mecanismos que podem contribuir para essa estabilização estão as interações dos compostos derivados da decomposição da biomassa com as superfícies minerais de cátions polivalentes. Isso explica porque o cálcio foi, entre as variáveis independentes analisadas, aquela que melhor explicou a variação dos teores de COAM. Esses cátions polivalentes interagem com grupos funcionais da matéria orgânica do solo formando pontes de cátions, levando à relativa estabilização da MOS (Moore & Turunen, 2004).

As ligações entre cátions polivalentes e grupos funcionais da matéria orgânica carregados negativamente não são facilmente reversíveis, e as superfícies de materiais orgânicos são menos acessíveis para atividade microbiana (Whittinghill & Hobbie, 2012). Por isso, numerosos estudos sobre estabilização de MOS se concentram em interações organominerais que retardam a rotatividade da MOS devido à proteção físico-química oferecida pela associação mineral contra a atuação dos decompositores (Ellerbrock & Gerke, 2018).

Outra vantagem deste processo é que no solo enriquecido com cálcio, por exemplo, o acúmulo de MOS, estabilizada por associação mineral, aumenta a capacidade do solo de reter cátions, melhorando a capacidade de enraizamento no solo e evitando os efeitos adversos da concentração de cátions ácidos na zona radicular (Ramos *et al.*, 2018). Isso significa que por meio desse processo a MOS é estabilizada contra as forças de decomposição e os cátions retidos contra as forças de lixiviação. Juntos estes processos podem contribuir para evitar a degradação dos solos nas condições do trópico úmido segundo Sena *et al.* (2020).

De fato, na última década, as interações positivas entre a MOS e cátions básicos foram demonstradas como um mecanismo essencial para aumentar a estabilização da matéria orgânica e reter os cátions básicos no perfil do solo (Ellerbrock & Gerke 2018). As ligações entre cátions polivalentes e grupos funcionais de matéria orgânica com carga negativa são agora bem

conhecidas, por sua menor acessibilidade à atividade microbiana e por isso são mais estáveis (Lützow *et al.*, 2006).

Experimentos em laboratório mostraram que a concentração de Ca trocável está correlacionada com uma redução nas perdas de MOS por respiração com a diminuição da emissão de CO² durante a incubação (Minick *et al.*, 2017). Portanto, o Ca trocável parece estar ligado a uma redução na propensão para decomposição de substratos de carbono, que não está ligada apenas aos seus efeitos sobre a ecologia microbiana, mas também na estrutura supramolecular organo-metal formada pelas interações orgânicos-cátions-orgânicos, como sugerido por Rowley *et al.* (2017). Estas estruturas estão, de alguma forma protegidas contra a oxidação pelos organismos do solo e por isso se observa que em solos ricos em cálcio são sempre também maiores os conteúdos de matéria orgânica.

Ao identificarmos as variáveis que influenciam na produtividade e como elas estão associadas entre elas e com outros atributos secundários, podemos propor uma agricultura sustentável para o trópico úmido, mais especificamente para os solos franco-arenosos da Amazônia maranhense, que se baseia em alguns princípios: 1) Aumento dos teores de cálcio no solo (cátion polivalente) sem elevar o pH, com o uso de gesso para proteção da fração estável da MOS; 2) Conservação da matéria orgânica através do revolvimento mínimo do solo; e 3) Uso de biomassa de alta qualidade que favoreçam o acúmulo de MOS.

5 Conclusões

As variáveis do solo que determinaram a produtividade do milho, em solo estruturalmente frágil, são carbono orgânico associado aos minerais, resistência a penetração e pH. O acréscimo do carbono orgânico associado aos minerais é favorecido pelo aumento dos teores de cálcio e pode diminuir a resistência à penetração e controlar a acidez do solo.

6 Referências Bibliográficas

Alameda, D., & Villar, R. (2012). Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. seedlings under soil compaction conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 79, 49-57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.01.004>

Bernardi, A. D. C., Bettiol, G. M., Ferreira, R. D. P., Santos, K. E. L., Rabello, L. M., & Inamasu, R. Y. (2016). Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. *Precision agriculture*, 17(6), 737-752. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s11119-016-9446-9>

Betzek, N. M., de Souza, E. G., Bazzi, C. L., Sobjak, R., Bier, V. A., & Mercante, E. (2017).

Interpolation methods for thematic maps of soybean yield and soil chemical attributes. *Semina: Ciências Agrárias*, 38(2), 1059-1069. doi: <https://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n2p1059>

Cambardella, C. A., & Elliott, E. T. (1992). Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil science society of America journal*, 56(3), 777-783. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>

Cassman, K. G. (1999). Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 5952-5959. doi: <https://dx.doi.org/10.1073/pnas.96.11.595>

Centenaro, G., Hudek, C., Zanella, A., & Crivellaro, A. (2018). Root-soil physical and biotic interactions with a focus on tree root systems: A review. *Applied soil ecology*, 123, 318-327. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.017>

Ellerbrock, R. H., & Gerke, H. H. (2018). Explaining soil organic matter composition based on associations between OM and polyvalent cations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(5), 721-736. doi: <https://doi.org/10.1002/jpln.201800093>

Fidalski, J., Tormena, C. A., Alves, S. J., & Auler, P. A. M. (2013). Influence of sand fractions on water retention and availability in Caiuá and Paranaíba sandstone formations. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(3), 613-621. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000300007>

Garcia, U. S. (2015). *Avaliação dos atributos físicos, químicos e estoque de carbono do solo em diferentes ambientes em matas de babaçu, no estado do Maranhão* (monografia, UEMA), 45.

Ghosh, B. N., Meena, V. S., Alam, N. M., Dogra, P., Bhattacharyya, R., Sharma, N. K., & Mishra, P. K. (2016). Impact of conservation practices on soil aggregation and the carbon management index after seven years of maize-wheat cropping system in the Indian Himalayas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 247-257. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.038>

Helyar, K. R., & Porter, W. M. (1989). Soil acidification, its measurement and the processes involved. *Soil acidity and plant growth*, 61102.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021). *Indicadores IBGE: estatística da produção agrícola 2020*. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 01/04/2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia.(2021). Normas Climatológicas dos municípios do Maranhão 2016-2020. Brasília. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> Acesso em: 01/04/2021.

Khdaier, A. I., Khdaier, S. I., & Abu-Rumman, G. A. (2019). Dataset on some soil properties improvement by the addition of olive pomace. *Data in brief*, 24, 103878. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103878>

Köppen, W.(1948). *Climatologia*. Mexico: Fundo de Cultura Econômica, 466.

Lützow, M. V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *European journal of soil science*, 57(4), 426-445. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>

Malik, A. A., Puissant, J., Buckeridge, K. M., Goodall, T., Jehmlich, N., Chowdhury, S., Griffiths, R. I. (2018). Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes. *Nature communications*, 9(1), 1-10. doi: <https://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-05980-1>

Minick, K. J., Fisk, M. C., & Groffman, P. M. (2017). Soil Ca alters processes contributing to C and N retention in the Oa/A horizon of a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 132(3), 343-357. doi: <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0307-z>

Moore, T. R., & Turunen, J. (2004). Carbon accumulation and storage in mineral subsoil beneath peat. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 690-696. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6900>

Moura, E. G., Portela, S. B., Macedo, V. R. A., Sena, V. G. L., Sousa, C. C. M., & Aguiar, A. D. C. F. (2018). Gypsum and legume residue as a strategy to improve soil conditions in sustainability of agrosystems of the humid tropics. *Sustainability*, 10(4), 1006. doi: <https://dx.doi.org/10.3390/su10041006>

Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490(7419), 254-257. doi: <https://doi.org/10.1038/nature11420>

Nicolodi, M., Gianello, C., Anghinoni, I., Marré, J., & Mielniczuk, J. (2008). Insuficiência do conceito mineralista para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas cultivadas no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 2735-2744. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700017>

Oliver, D. P., Bramley, R. G. V., Riches, D., Porter, I., & Edwards, J. (2013). soil physical and chemical properties as indicators of soil quality in A ustralian viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 19(2), 129-139. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/ajgw.12016>

Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>

Paz-Gonzalez, A., Vieira, S. R., & Castro, M. T. T. (2000). The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 97(3-4), 273-292. doi: [https://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00066-5](https://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00066-5)

Puttaso, A., Vityakon, P., Rasche, F., Saenjan, P., Treloges, V., & Cadisch, G. (2013). Does organic residue quality influence carbon retention in a tropical sandy soil?. *Soil Science Society of America Journal*, 77(3), 1001-1011. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0209>

Ramos, F. T., Dores, E. F. D. C., Weber, O. L. D. S., Beber, D. C., Campelo Jr, J. H., & Maia, J. C. D. S. (2018). 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*, 98(9), 3595-3602. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8881>

Reichert, J. M., Rodrigues, M. F., Bervald, C. M. P., & Kato, O. R. (2016). 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*, 27(5), 1403-1412. doi: <https://doi.org/10.1002/ldr.2395>

Rittl, T. F., Oliveira, D., & Cerri, C. E. (2017). Soil carbon stock changes under different land uses in the Amazon. *Geoderma Regional*, 10, 138-143. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.07.004>

Rowley, M. C., Grand, S., & Verrecchia, É. P. (2018). Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry*, 137(1), 27-49. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1>

Santos, H. G., JACOMINE, P. K. T., Dos Anjos, L. H. C., De Oliveira, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., CUNHA, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

Schoenholtz, S. H., Van Miegroet, H., & Burger, J. A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest ecology and management*, 138(1-3), 335-356. doi: [https://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)

Sena, V. G., De Moura, E. G., Macedo, V. R., Aguiar, A. C., Price, A. H., Mooney, S. J., & Calonego, J. C. (2020). Ecosystem services for intensification of agriculture, with emphasis on increased nitrogen ecological use efficiency. *Ecosphere*, 11(2), e03028. doi: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3028>

Signor, D., Deon, M. D. I., Camargo, P. B. D., & Cerri, C. E. P. (2018). Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under different land uses in Eastern Amazon. *Scientia Agricola*, 75, 225-232. doi: <https://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0089>

Swallow, W. H. (1978). Agricultural Experimentation: Design and Analysis. *Soil Science*, 126 (6),373.

Tarkiewicz, S., & Nosalewicz, A. (2005). Effect of organic carbon content on the compactibility and penetration resistance of two soils formed from loess. *International agrophysics*, 19(4), 345-350.

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise de solo. *Brasília: Embrapa*, 573.

UNITED NATIONS. DepartmentofEconomicand Social Affairs, Population Division. (2017). World Population Prospects: The 2017 revision, keyfindingsandadvancetables. *In: Technical*

Report. WorkingPaper, ESA/P/WP:241.

Uslowicz, B., & Lipiec, J. (2021). Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. *Scientific Reports*, *11*(1), 1-12. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86862-3>

Uslowicz, B., & Lipiec, J. (2017). Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. *Soil and Tillage Research*, *174*, 241-250. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.07.015>

Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Titttonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, *143*, 4-17. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

WARRICK, A. W. & NIELSEN D. R.(1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. *In*: Hillel, D. (Ed.) Applications of soil physics. New York: Academic Press: 319-344.

Whittinghill, K. A., & Hobbie, S. E. (2012). Effects of pH and calcium on soil organic matter dynamics in Alaskan tundra. *Biogeochemistry*, *111*(1), 569-581. doi: <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9688-6>

Yeomans, J. C., & Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in soil science and plant analysis*, *19*(13), 1467-1476. doi: <https://dx.doi.org/10.1080/00103628809368027>

CAPÍTULO III

VARIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO EM AGROSSISTEMAS DA AMAZÔNIA MARANHENSE

Capítulo elaborado de acordo com as normas da Revista Agroforestry Systems
<https://www.springer.com/journal/10457/submission-guidelines>

VARIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO EM AGROSSISTEMAS DA AMAZÔNIA MARANHENSE

Resumo: No município de Pindaré-Mirim e em outras regiões da Amazônia Legal, é predominante a prática de conversão de florestas nativas em pastagens para pecuária de corte tradicional ou agricultura convencional, que rapidamente atingem o estágio de degradação. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar atributos químicos e físicos do solo em diferentes agrossistemas, na Amazônia maranhense. O experimento foi conduzido em quatro agrossistemas: I) Mata secundária; II) Pastagem convencional; III) Lavoura convencional e IV) Sistema agrossilvipastoril entre novembro e maio, durante o ano agrícola de 2019/2020, no município de Pindaré Mirim, MA, Brasil. Para avaliação dos atributos físicos do solo, foram abertas cinco trincheiras 30x30x30cm em cada uso da terra, distribuídas de forma aleatória na área, para determinação de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo. Para avaliação dos atributos químicos (pH, P, Ca, Mg, K, Na e Al) e frações de carbono orgânico (COT, COP e COAM) foram coletadas amostras deformadas simples ao redor de cada trincheira, em doze pontos equidistantes nas direções cardeais e separados por uma distância de 10 m. Nos agrossistemas, a profundidade de amostragem e suas interações influenciaram de forma significativa alguns dos atributos físicos. Os maiores valores de macroporosidade e porosidade foram observados na mata secundária, com 0,15 e 0,48 m³m⁻³. A microporosidade foi o único atributo físico que se diferenciou entre as profundidades sendo maior na camada superficial (0,34m³m⁻³) e menor na camada mais profunda (0,32m³m⁻³). Para os atributos químicos, os maiores valores de P foram observados na lavoura (8,23mg dm⁻³) e no sistema agrossilvipastoril (7,02mg dm⁻³), e foram em média 120% superior aos teores amostrados em solos com pastagem e capoeira. Os teores de Ca e Mg foram inferiores nos solos com pastagem, com 25,72 e 26,09 mmolc dm⁻³, respectivamente. Os teores de K foram estatisticamente maiores no ambiente com lavoura, atingindo 8,34 mmolc dm⁻³. Entre as frações de carbono orgânico, o único compartimento que se diferenciou entre os agrossistemas foi o COAM, cujos teores foram, em média, 180% superiores no sistema agrossilvipastoril e na mata em contraste a lavoura convencional de milho. Os estoques de COAM atingiram 11 Mg ha⁻¹ no sistema agrossilvipastoril e 3,57Mg ha⁻¹ na lavoura convencional de milho. Em profundidade, houve um declínio nos teores e estoques de carbono para todas as frações analisadas. Entre os agrossistemas avaliados, o sistema agrossilvipastoril proporcionou incremento na fertilidade do solo e estabilização da matéria orgânica quando comparada a pastagem convencional e assemelhando-se aos solos da mata secundária. Em regiões tropicais, com solos frágeis na Amazônia maranhense o sistema agrossilvipastoril representa uma ótima estratégia para recuperação ambiental das pastagens degradadas ou lavouras convencionais.

Palavras-chave: Agrossilvipastoril, Matéria orgânica, Pastagem convencional.

SOIL FERTILITY VARIATION IN AGROSSYSTEMS IN THE MARANHENSE AMAZON

Abstract: In the municipality of Pindaré-Mirim and in other regions of the Legal Amazon, the practice of converting native forests into pastures for traditional cutting cattle ranching or conventional agriculture is predominant, and the degradation stage rapidly occurs. The objective of this work was to compare variations in soil attributes in different agrossystems in the Amazon region of Maranhão. The experiment was conducted in four agroecosystems: I) Secondary forest; II) Conventional pasture; III) Conventional farming and IV) Agroforestry system between November and May, during the 2019/2020 agricultural year, in the municipality of Pindaré Mirim, MA, Brazil. To assess the physical attributes of the soil, five 30x30x30cm trenches were opened in each land use, randomly distributed in the area, to determine (macroporosity, microporosity, total porosity and soil density). To evaluate the chemical attributes (pH, P, Ca, Mg, K, Na and Al) and organic carbon fractions (COT, COP and COAM) simple deformed samples were collected around each trench, at twelve equidistant points in the cardinal directions and separated by a distance of 10m. In agrossystems, sampling depth and its interactions significantly influenced some of the physical attributes. The highest values of macroporosity and porosity were observed in the secondary forest, with 0.15 and 0.48m³m⁻³. Microporosity was the only physical attribute that differed between depths, being greater in the superficial layer (0.34 m³m⁻³) and smaller in the deepest layer (0.32m³m⁻³). For the chemical attributes, the highest P values were observed in the crop (8.23mg dm⁻³) and in the agroforestry system (7.02mg dm⁻³), and were on average 120% higher than the contents sampled in soils with pasture and capoeira. Ca and Mg contents were lower in pasture soils, with 25.72 and 26.09 mmol_c dm⁻³, respectively. The K contents, in turn, were statistically higher in the tillage environment, reaching 8.34 mmol_c dm⁻³. Among the organic carbon fractions, the only compartment influenced by agroecosystems was the organic carbon associated with minerals, whose contents were, on average, 180% higher in the agroforestry system and in the forest, in contrast to the conventional corn crop. Coam stocks reached 11Mg ha⁻¹ in the agroforestry system and 3.57Mg ha⁻¹ in the conventional corn crop. In depth, there was a decline in carbon contents and stocks for all analyzed fractions. Among the evaluated agrossystems, the agrosilvopastoral system provided an increase in soil fertility and stabilization of organic matter when compared to degraded pasture and resembled secondary forest soils. In tropical regions, with fragile soils, in the Amazon region of Maranhão, the agroforestry system represents one of the best strategies for environmental recovery of conventional pastures or conventional crops.

Keywords: Agrosilvopastoral, Organic matter, Conventional pasture.

1 Introdução

No município de Pindaré-Mirim e em outras regiões da Amazônia Legal, é predominante a prática de conversão de florestas nativas em pastagens para pecuária de corte tradicional ou agricultura convencional, que rapidamente atingem o estágio de degradação. A degradação da pastagem constitui-se como um dos principais problemas agrônômicos para a atividade pecuária, ocupando 90% da área total das pastagens do nordeste brasileiro (Dias-Filho 2014) e contribuindo para o aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEEs), como metano, óxido nitroso e dióxido de carbono. Conforme informações do sistema PRODES, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), até 2010 71,05% do Estado havia sido desmatado e hoje, resta à Amazônia maranhense menos de 25% de sua vegetação original (INPE 2016).

No caso específico do trópico úmido, os indicadores principais que expressam a saúde do solo são os seus teores de carbono, de fósforo e de cátions básicos (Quesada et al. 2020). Segundo Moura et al. (2020), infelizmente, a manutenção desses indicadores em níveis satisfatórios vai de encontro aos fatores climáticos que atuam intensamente nos processos que decompõem a matéria orgânica (alta temperatura) e lixiviam as bases do perfil (chuvas intensas). Essa forte atuação dos fatores do clima tornam o desafio de evitar a degradação da terra uma tarefa difícil, que deve exigir mudanças profundas no modelo de uso solo, para tornar sustentável a condução dos agrossistemas (Signor et al. 2018).

Com objetivo de recuperar ou reformar as pastagens degradadas, os sistemas agrossilvipastoris são um conjunto de estratégias que integram atividades agrícolas, pecuárias e florestais em sinergia na mesma área, sob cultivo consorciado, sucessão ou rotação (Balbino et al. 2012). Diversos benefícios ambientais, em escala global e local, têm sido atribuídos a estes sistemas, como a conservação do solo e dos recursos hídricos, a promoção do sequestro de carbono, a flexibilidade do fluxo de caixa ao longo do ano e o aumento da biodiversidade.

Essas mudanças na configuração do sistema de produção têm impacto direto sobre a qualidade da matéria orgânica do solo, um dos maiores reservatórios terrestres de carbono. A dinâmica da matéria orgânica é conduzida pela adição de resíduos orgânicos de diversas naturezas e pela transformação contínua sob ação de fatores biológicos, químicos e físicos. Signor et al. (2014) explicam que estas alterações na matéria orgânica do solo podem ser medidas por meio de mudanças no estoque de C no solo e nas suas frações químicas, físicas ou em combinações dessas.

Diante do modelo tradicional de sucessão de ambientes nativos em pastagens ou áreas agrícolas, seguidas de superpastejo, na região amazônica do Estado do Maranhão e tendo em vista o compromisso do Brasil na implantação de sistemas integrados para redução das emissões GEE's, este trabalho baseia-se na hipótese que o sistema agrossilvipastoril, em comparação aos agrossistemas convencionais, proporciona maior fertilidade do solo devido a manutenção superficial de biomassa das gramíneas e das podas do componente florestal, além do maior volume de raízes no solo. Assim, objetivou-se avaliar atributos químicos e físicos do solo em diferentes agrossistemas, na Amazônia maranhense.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido em quatro agrossistemas, entre novembro e maio, durante o ano agrícola de 2019/2020, no município de Pindaré Mirim, MA, Brasil. A área amostral está localizada entre as coordenadas geográficas 3° 76' 4.08'' S de latitude, 45° 49' 17.00'' W de longitude e 33 m ao nível do mar, com relevo suave-ondulado (inclinação <5%). O clima da região é do tipo Aw tropical úmido, segundo Köppen (1948), com período chuvoso e seco bem definido e uma precipitação média de 2.100 mm ano⁻¹ (Figura 11). A temperatura mínima é de 23 °C, a máxima de 37 °C e a temperatura média é de aproximadamente 27 °C (INMET 2021).

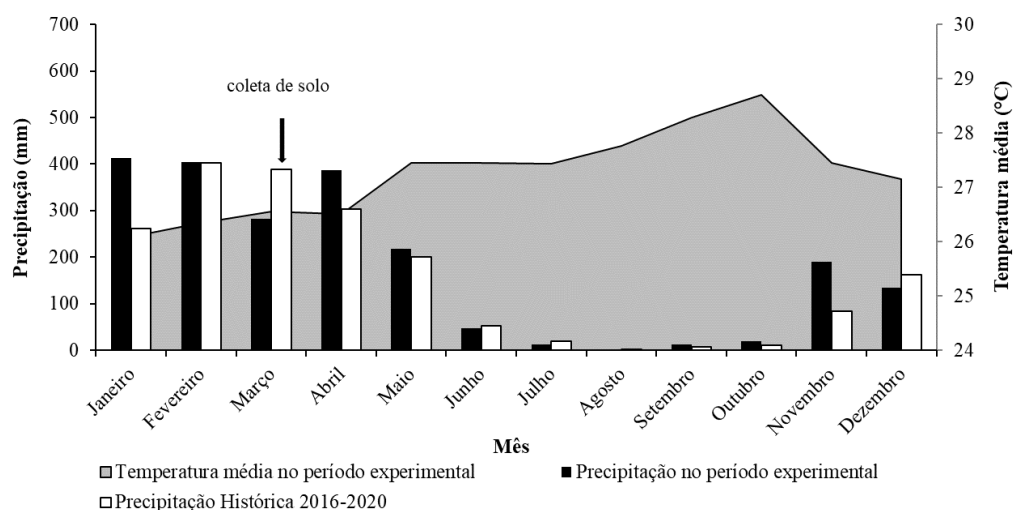


Figura 11. Médias mensais dos dados históricos de precipitação (mm) entre 2016 e 2020 e temperatura média no período experimental da região de Pindaré-Mirim, obtidos juntos à Agência Nacional de Águas e ao Instituto Nacional de Meteorologia, respectivamente.

Geologicamente, o município encontra-se na Formação Itapecuru, formada no

Cretáceo Superior (Santos et al. 2013). O solo foi classificado como Plintossolo Argilúvico Distrófico típico (Garcia 2015), recoberto originalmente por vegetação de Floresta Ombrófila Aberta de Terras Baixas, com predomínio da palmeira babaçu (*Atallea speciosa* Mart.).

2.2 Histórico e condução das áreas de cultivo

Nesse estudo, foram avaliados quatro agrossistemas: I) Mata secundária; II) Pastagem convencional; III) Lavoura convencional e IV) Sistema agrossilvipastoril (Figura 12).

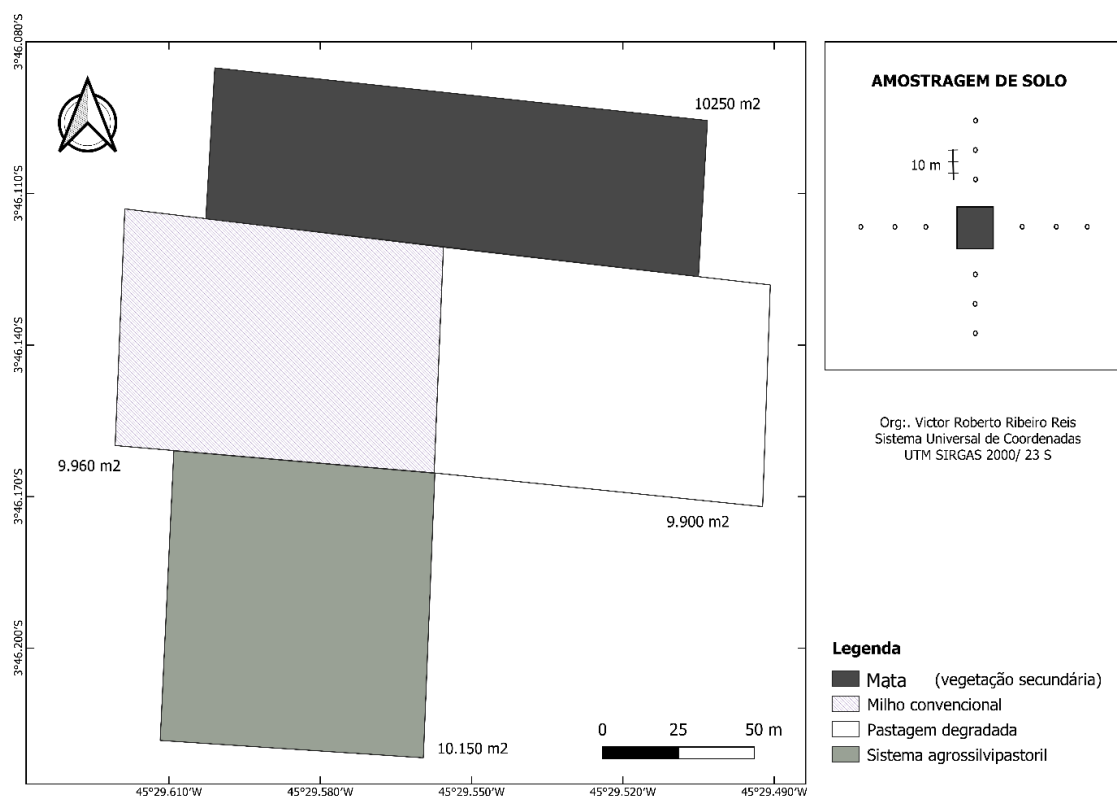


Figura 12. Desenho da área experimental mostrando a distribuição das áreas de uso da terra.

O agrossistema com lavoura convencional de milho foi iniciado com o preparo da área, substituindo a pastagem convencional com *Urochloa brizantha* cv. Marandu com aproximadamente 20 anos do seu estabelecimento. Na área total de dois hectares, foram incorporados 1 Mg ha^{-1} de calcário calcítico e $0,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso agrícola, de acordo com o resultado da análise de solo. Aos 40 dias após a correção do solo foi realizado o plantio do milho BM709 PRO2 híbrido, tolerante a insetos da ordem Lepidóptera e ao herbicida glifosato.

O espaçamento utilizado foi de $0,27 \text{ m}$ entre plantas e $0,5 \text{ m}$ entre linhas, 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 com a fonte ureia, quando o milho possuía sete folhas completamente desenvolvidas. Para o controle de plantas daninhas foram aplicados 3 L ha⁻¹ de glifosato e 5 L ha⁻¹ de atrazina e para o controle de insetos e doenças fúngicas foram utilizados, respectivamente, 130 ml ha⁻¹ de lambda-cialotrina e 200 ml ha⁻¹ azoxistrobina.

A área em sistema agrossilvipastoril foi implantada em 2016, em 3 ha, também em substituição a pastagem convencional. Foram realizadas duas safras de milho híbrido KWS 9304, consorciado com pastagem Marandu para alimentação de bovinos de corte e o componente arbóreo um híbrido de Eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus tereticornis*), em sistema Santa Fé. Foi utilizada 1,0 t ha⁻¹ de calcário dolomítico para a primeira safra de milho. Nas duas safras de milho, após 15 dias da semeadura foi aplicado os herbicidas Atrazina (controle de folhas largas) e Nicosulfuron (uma subdosagem de 1/3 para provocar um atraso no desenvolvimento da forragem).

Para a cultura do milho 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. Para a semeadura da espécie forrageira foram utilizados 10 kg ha⁻¹ de sementes viáveis. A adubação da cultura do milho foi realizada da seguinte maneira: adubação de plantio = 400 kg ha⁻¹ da fórmula 04 - 30 - 10 + Zn; 1ª adubação de cobertura = 200 kg ha⁻¹ da fórmula 36-00-30, após as plantas atingirem quatro folhas totalmente desenvolvidas; e a 2ª adubação de cobertura foi com a mesma quantidade e formulado aplicados, quando as plantas atingiram sete folhas completamente desenvolvidas. A partir do ano de 2019, o capim foi adubado com uma média de 200 kg N ha⁻¹ano⁻¹, com uma capacidade de suporte de aproximadamente 4 UA ha⁻¹ ano⁻¹, durante o período chuvoso.

A pastagem convencional é cultivada com Marandu, similar à cobertura que precede os usos com lavoura convencional e sistema agrossilvipastoril. Nesse estudo, a área da Mata secundária é caracterizada pelo estabelecimento há 20 anos com predomínio de babaçu, e foi utilizada como referência para as correções pela massa de solo equivalente.

2.3 Coleta e análise dos atributos do solo

Foram abertas cinco trincheiras 30 x 30 x 30 cm em cada uso da terra, distribuídas de forma aleatória na área e utilizadas três paredes da trincheira para coleta das amostras indeformadas nas profundidades 0-15 e 15-30 cm. Para retirada das amostras deformadas simples, foram distribuídos, ao redor de cada trincheira, doze pontos equidistantes nas direções

cardeais e separados por uma distância de 10 m (Figura 13). As amostras indeformadas foram utilizadas para determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo. Para quantificação das variáveis químicas, composição granulométrica e frações de carbono foram coletadas amostras deformadas.

Para a determinação dos atributos físicos do solo foram feitas as seguintes análises, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017): a densidade do solo foi calculada pela expressão: $D_s = m/v$. em que: D_s = densidade do solo, expressa em $g\ cm^{-3}$; m = massa do solo da amostra seca a $105^\circ C$ até atingir massa constante; e v = volume do anel. A macroporosidade (com poros maiores que 0,05mm) e a microporosidade (com poros menores que 0,05mm), foram obtidas pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 0,60m e a porosidade total foi calculada divisão da densidade do solo e densidade de partículas (Teixeira et al. 2017). Nesse trabalho considerou-se a densidade de partículas para solos com textura média igual à $2,65g\ cm^{-3}$ (Reichardt, 1987).

Para a determinação dos atributos químicos do solo foram feitas as seguintes análises (Teixeira et al. 2017): o pH em água foi determinado eletronicamente por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão de solo e água na proporção 1:2,5. Cálcio, magnésio e alumínio trocáveis foram extraídos com solução de KCl $1\ mol\ L^{-1}$. O cálcio e magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e a determinação do Al trocável foi feita por titulação com NaOH $0,025\ ml\ L^{-1}$.

O fósforo disponível, potássio e sódio trocáveis foram extraídos com solução Mehlich¹ ($0,05\ mol\ L^{-1}$ de HCl + $0,0125\ mol\ L^{-1}$ de H_2SO_4); o fósforo foi determinado espectroscopicamente por meio da leitura da intensidade da cor do complexo fosfomolibdico produzido pela redução de molibdato com ácido ascórbico; potássio e sódio foram determinados por fotometria de emissão de chama.

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados por digestão úmida com a mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico, sob aquecimento externo, adaptado de Yeomans e Bremner (1988). As amostras de solo de terra fina seca ao ar (TFSA) foram maceradas em gral de porcelana e passadas em peneira de malha de 60 mesh. Para a determinação do teor de C foram pesadas 0,5 g de TFSA em tubos de digestão e adicionados 5 ml de $K_2Cr_2O_7$ $0,167\ M$ e 5,0 ml de Ácido Sulfúrico Conc. PA. Nessas mesmas condições foram analisados seis brancos somente com os reagentes, sendo três tubos aquecidos e três não aquecidos.

O conjunto de tubos contendo as amostras de solo foi levado para o bloco digestor por

60 minutos, aquecido a 170 °C. Após esse procedimento, as amostras contidas em cada tubo foram transferidas para erlenmayer de 250 ml, usando 80 ml de água destilada. Após esfriar, foram adicionadas três gotas do indicador difenilamina e procedido a titulação com sulfato ferroso amoniacal 0,1M até viragem de cor roxo para verde.

O fracionamento granulométrico da MOS será realizado segundo Cambardella e Elliott (1992). Dez gramas de TFSA foram submetidas à agitação horizontal por 15 horas na presença de 40 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}). Em seguida, a suspensão foi passada em peneira de 53 μm com o auxílio de jato de água. O material retido na peneira, que consiste no carbono orgânico particulado (COP) associado à fração areia, foi seco em estufa a 60°C, quantificado em relação a sua massa, moído em gral de porcelana e analisado em relação ao teor de carbono orgânico, conforme descrito por Yeomans e Bremner (1988). O material que passar pela peneira de 53 μm , que consiste no carbono orgânico associado aos minerais (COAM) das frações silte e argila, será obtido por diferença entre o COT e COP.

A partir dos teores totais de C nas amostras de solo calculou-se os estoques de C (Mg ha^{-1}), de acordo com a equação: $\text{estoque} = \text{teor} \times \text{ds} \times \text{espessura}$, em que o “teor” é o teor do carbono no solo em g kg^{-1} , ds é a densidade do solo em g cm^{-3} e “espessura” é a espessura da camada, em cm, para a qual o estoque está sendo calculado.

Entretanto, solos submetidos a manejos diferentes podem ter densidades diferentes, o que implica na comparação de massas diferentes de solo quando se consideram camadas com a mesma espessura, como as utilizadas na amostragem feita nesse estudo. Portanto, para comparar adequadamente os estoques de C entre as áreas, foi necessário fazer uma correção pela equação sugerida por Carvalho et al. (2009), baseado nos trabalhos de Moraes et al. (1996) e Veldkamp (1994).

Partindo da premissa proposta por Veldkamp (1994), de que a relação entre a densidade aparente e a espessura da camada permanece constante em relação ao solo de referência, o cálculo do estoque de cada camada amostrada pode ser calculado pela equação: $\text{estoque} (\text{Mg ha}^{-1}) = [\text{teor} \times \text{ds} \times (\text{D}_{\text{Sref}} / \text{D}_{\text{s}}^* \text{ e})] / 10$, em que acrescenta-se a equação anterior a variável D_{Sref} que corresponde a densidade do solo para profundidade amostrada na área de referência (g cm^{-3}). Nesse estudo, essas correções foram feitas utilizando como referência a área da mata secundária.

2.4 Análise estatística

O delineamento experimental empregado foi o inteiramente casualizado, com 4 tratamentos (agrossistemas) e 2 profundidades de coleta (0-15 e 15-30cm), com unidades amostrais coletadas ao acaso (independentes) como réplicas ou parcelas (pseudoréplicas) (Ferreira et al. 2012). As análises de dados consistiram na realização do teste de normalidade pelo método de Shapiro wilk e o teste homogeneidade de variância pelo método de Bartlett, e posteriormente, foi realizada a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey, ambas análises a 5% de significância. Como análise complementar serão aplicados métodos multivariados através da análise de agrupamento não hierárquica pelo método de Tocher e componentes principais, ambas realizadas com base na distância euclidiana. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa R Statistic 3.5.0.

3 Resultados

Os agrossistemas, a profundidade de amostragem e suas interações influenciaram de forma significativa alguns dos atributos físicos avaliados (Tabela 5). A diferenciação dos agrossistemas entre atributos físicos, de forma geral, ocorreu apenas quando se comparou a mata secundária com os demais ambientes.

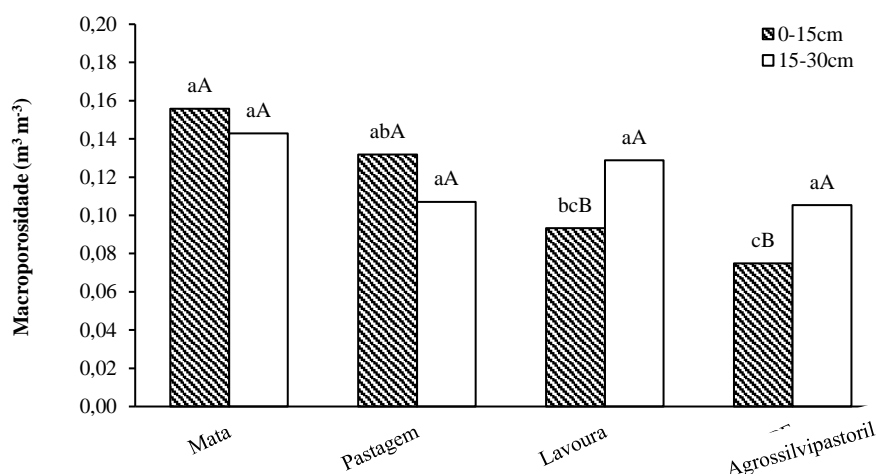
Os maiores valores de macroporosidade e porosidade total foram observados na mata secundária, com 0,15 e 0,48m³ m⁻³, respectivamente. Os solos de mata secundária atingiram uma densidade média de 1,37 g cm⁻³ e foram aproximadamente 8% menos densos, se comparados aos solos de pastagem, lavoura e agrossilvipastoril. A microporosidade não apresentou diferença significativa para as alterações de ambientes. Contudo, foi o único atributo físico que diferenciou-se entre as profundidades, sendo maior na camada superficial (0,34 m³m⁻³) em relação acamada mais profunda (0,32 m³m⁻³).

Tabela 5. Valores médios dos atributos físicos do solo em função dos agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e Agrossilvipastoril) e das profundidades de coleta do solo (0-15 e 15-30 cm) em solo frágil da Amazônia maranhense.

Fatores	MAC	MIC	PT	Ds
	m ³ m ⁻³			g cm ⁻³
Agrossistemas (A)				
Mata secundária	0,15 a	0,34 a	0,48 a	1,37 b
Pastagem	0,12 ab	0,32 a	0,44 b	1,49 a
Lavoura	0,11 b	0,33 a	0,44 b	1,47 a
Agrossilvipastoril	0,09 b	0,35 a	0,44 b	1,49 a
Valor-P	0,0038	0,2243	0,0001	0,0001
Fatores	MAC	MIC	PT	Ds
	m ³ m ⁻³			g cm ⁻³

Prof. (B)				
0-15 cm	0,11 a	0,34 a	0,46 a	1,43 a
15-30 cm	0,12 a	0,32 b	0,44 a	1,47 a
Valor-P	0,2729	0,0086	0,0512	0,0515
A × B				
Valor-P	0,0161	0,0839	0,3246	0,3256

Ainda houve interação entre os agrossistemas e as profundidades para o atributo macroporosidade ($p=0,016$), sendo que na camada 0-15cm, a macroporosidade é menor nos solos sob sistema agrossilvipastoril ($0,07\text{m}^3\text{m}^{-3}$) e lavoura ($0,09\text{m}^3\text{m}^{-3}$) e, diferentemente dos solos sob pastagem e mata secundária (Figura 13). Houve um aumento na macroporosidade na profundidade de 15-30 cm, atingindo $0,13\text{m}^3\text{m}^{-3}$ na lavoura e $0,11\text{m}^3\text{m}^{-3}$ no sistema agrossilvipastoril.



Nota: Para cada variável, letras minúsculas comparam áreas, letras maiúsculas comparam profundidades, letras iguais não diferem significativamente ($P > 0,05$) pelo teste de Tukey.

Figura 13. Desdobramento da interação entre os agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e Agrossilvipastoril) e as profundidades de coleta do solo (0-15 e 15-30 cm) para o atributo macroporosidade.

Os agrossistemas e a profundidade de amostragem diferenciaram-se de forma significativa para todos os atributos químicos, com exceção do pH e Na (Tabela 6). Não houve efeito de interação para esse grupo de variáveis. Os maiores valores de P foram observados na lavoura ($8,23\text{mg dm}^{-3}$) e no sistema agrossilvipastoril ($7,02\text{mg dm}^{-3}$), e foram em média 120% superior aos teores amostrados em solos com pastagem e mata secundária.

Os teores de Ca e Mg foram inferiores nos solos com pastagem, com $25,72$ e $26,09\text{mmolc dm}^{-3}$, respectivamente (Tabela 6). Os teores de K, por sua vez, foram estatisticamente maiores no ambiente com lavoura, atingindo $8,34\text{mmolc dm}^{-3}$, que representa um incremento

de 94% se comparado aos demais agrossistemas. Apesar de não haver alteração entre os teores de Al quando comparou-se os diferentes ambientes, percebemos valores 132% maiores na profundidade 15-30 cm em contraste com a camada 0-15cm. Os teores de Mg decresceram ligeiramente em profundidade.

Tabela 6. Valores médios dos atributos químicos do solo em função dos agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e Agrossilvipastoril) e das profundidades de coleta do solo (0-15 e 15-30 cm) em solo frágil da Amazônia maranhense.

Fatores	pH	P mg dm ⁻³	Ca	Mg	K	Na	Al
			mmol _c dm ⁻³				
Agrossistemas (A)							
Mata secundária	4,77 a	3,64 b	52,00 a	40,92 ab	4,84 b	8,27 a	5,21 a
Pastagem	4,18 a	3,26 b	25,72 b	26,09 b	4,57 b	2,89 a	8,42 a
Lavoura	4,34 a	8,23 a	35,75 ab	44,42 a	8,34 a	14,02 a	1,67 a
Agrossilvipastoril	4,63 a	7,02 a	34,82 ab	37,10 ab	4,93 b	7,85 a	7,02 a
Valor-P	0,2213	0,0248	0,0288	0,0490	0,0006	0,0037	0,2476
Prof. (B)							
0-15 cm	4,49 a	5,11 a	35,21 a	40,39 a	5,79 a	8,39 a	3,36 b
15-30 cm	4,47 a	5,97 a	38,93 a	33,87 b	5,54 a	8,12 a	7,80 a
Valor-P	0,7532	0,5024	0,4739	0,0157	0,1975	0,3292	0,0187
A × B							
Valor-P	0,6209	0,3459	0,0607	0,2629	0,3113	0,3630	0,2564

Entre as frações de carbono orgânico, o único compartimento diferenciado entre os agroecossistemas foi o carbono orgânico associado aos minerais (Tabela 7). Os teores de COAM foram, em média, 180% superiores no sistema agrossilvipastoril e na mata secundária em contraste a lavoura convencional de milho. Os estoques de COAM atingiram 11 Mg ha⁻¹ no sistema agrossilvipastoril e 3,57 Mg ha⁻¹ na lavoura convencional de milho. Em profundidade, houve um declínio nos teores e estoques de carbono para todas as frações analisadas. Não houve efeito da interação agrossistema e profundidade.

Tabela 7. Valores médios das frações e estoques de carbono do solo em função dos agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e Agrossilvipastoril) e das profundidades de coleta do solo (0-15 e 15-30 cm) em solo frágil da Amazônia maranhense.

Fatores	Cot	Cop	Coam	EstCOT	EstCOP	EstCOAM
	g kg ⁻¹			Mg ha ⁻¹		
Agrossistemas (A)						
Mata secundária	7,57 a	3,16 a	4,41 a	15,46 a	6,11 a	9,03 ab
Pastagem	8,85 a	5,09 a	3,77 ab	18,05 a	10,41 a	7,65 ab
Lavoura	6,82 a	5,07 a	1,75 b	13,90 a	10,33 a	3,57 b
Agrossilvipastoril	8,51 a	2,99 a	5,38 a	17,41 a	6,43 a	11,00 a
Valor-P	0,5119	0,0528	0,0325	0,5088	0,0521	0,0325
Prof. (B)						
0-15 cm	9,37 a	4,88 a	4,46 a	18,82 a	9,80 a	8,97 a
15-30 cm	6,51 b	3,28 b	3,19 b	13,60 b	6,84 b	6,66 b
Valor-P	0,0000	0,0002	0,0141	0,0001	0,0004	0,0250
A × B						
Valor-P	0,0655	0,0788	0,0825	0,0667	0,0790	0,0824

Na tabela 8 estão apresentadas as porcentagens da variância explicada pelos componentes principais 1, 2 e 3. Os componentes 1, 2 e 3 explicam, respectivamente, 41,36, 37,78 e 20,86% da variância total dos atributos estudados e somados os componentes 1 e 2 alcançam 79,14% da variação dos dados. De acordo com os autovalores, no primeiro componente principal, destacaram-se os teores de Mg, Na, Ca, Al e COT. No segundo componente principal ficou evidente a relação entre K, COAM, PT, P e COP.

Tabela 8. Análise de componentes principais (CP), autovalores, porcentagem da variância total e variância acumulada explicadas pelos componentes principais (VCP%) dos atributos do solo, em diferentes agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e sistema Agrossilvipastoril), na Amazônia maranhense.

Atributos	CP1	CP2	CP3
Na	0,82	0,57	-0,03
K	0,48	0,85	-0,22
Ca	0,81	-0,55	-0,21
Mg	0,97	0,24	-0,01
Al	0,81	0,47	0,35
P	0,48	0,75	0,45
pH	0,71	-0,64	0,30
COT	-0,81	-0,42	0,40
COP	-0,45	0,70	-0,56
COAM	-0,15	-0,77	0,62
MAC	0,21	-0,58	-0,79
MIC	0,59	-0,35	0,73
PT	0,51	-0,76	-0,41
Ds	-0,60	0,64	0,48

Continua na página seguinte

	CP1	CP2	CP3
Autovetores	5,79	5,29	2,92
Variância total (%)	41,36	37,78	20,86
Variância acumulada (%)	41,36	79,14	100,00

Ao analisar o agrupamento na figura 14, percebemos a formação de três grupos distintos de agrossistemas: o primeiro é composto pela lavoura convencional que favorece os teores de K, Na, Al, Mg e P; o segundo grupo é formado pela mata e o sistema agrossilvipastoril que possuem estreita relação com o aumento no pH, MAC, MIC, PT, COAM e teores de Ca; e o terceiro grupo formado apenas pela pastagem convencional, que não possui proximidade com nenhuma das variáveis.

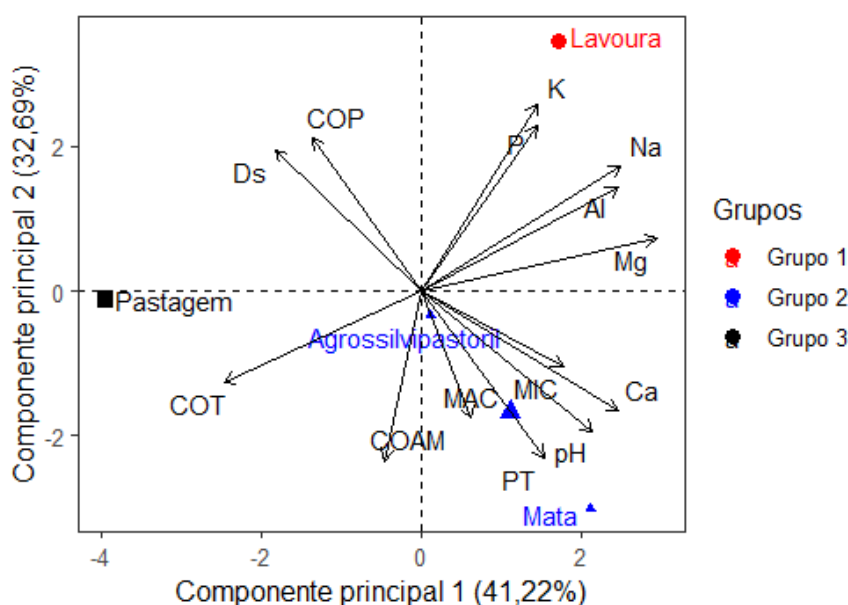


Figura 14. Gráfico biplot dos componentes principais (CP1 e CP2) e agrupamento dos atributos físicos, químicos e fracionamento de carbono, em diferentes agrossistemas (Mata secundária, Pastagem, Lavoura e sistema Agrossilvipastoril), na Amazônia maranhense.

4 Discussão

Ao analisar os atributos físicos a macroporosidade, porosidade total e densidade foram diferenciadas do ambiente natural, nesse estudo representado pela mata secundária, em relação aos demais sistemas; contudo a microporosidade não foi afetada.

O aumento da porosidade e diminuição da densidade está relacionado ao acréscimo na taxa de infiltração do solo (Sun et al. 2018). A infiltração de água no solo é um processo importante do ciclo da água em ecossistemas terrestres, que influenciam o balanço hídrico da vegetação,

potencial perda de solo superficial por erosão, escoamento e recarga de água subterrânea (Zhao et al. 2013)

Em ecossistemas agrícolas, o uso de implemento, normalmente, leva a compactação do solo, afetando a estrutura do solo (Alaoui et al. 2011). Por outro lado, a floresta, geralmente tem maiores teores de matéria orgânica, riqueza e diversidade de espécies, o que pode resultar em maior porosidade e menor densidade (Fischer et al. 2015).

Em relação aos atributos químicos a pastagem possui os menores valores de P, Ca, Mg e K. As pastagens apresentaram os menores teores desses elementos, em decorrência da constante remoção dos elementos através do pastejo contínuo extensivo por anos sem que houvesse a prática de adubação de manutenção (Cherubin et al. 2015). Por outro lado, neste estudo, o ambiente de referência não antropizado possui os maiores teores de cálcio, mostrando-nos que este elemento pode ser um bom indicador para se avaliar a sustentabilidade e a viabilidade dos agrossistemas (Quesada et al. 2020).

A fração de carbono orgânico influenciada pelo manejo foi o carbono orgânico associado aos minerais, isso comprova o que outros autores afirmam há alguns anos que o COAM é um bom indicador para avaliação da sustentabilidade de agrossistemas em solos Amazônicos (Durigan et al. 2017).

O manejo convencional do solo é conhecido por promover a decomposição e reduzir a entrada de matéria orgânica, pois interrompe os microagregados e macroagregados, liberando carbono orgânico aprisionado, e aumentando a aeração do solo (Jensen et al. 2020). O manejo inadequado desses solos causa uma perda dos macroagregados e um ganho nos microagregados. Quando os solos são submetidos a cultivo intensivo, mudanças físicas, como a compressão, podem limitar o crescimento e a atividade dos microrganismos, alterando a atmosfera do solo, reduzindo assim a taxa de decomposição da MOS. O cultivo de solo virgem leva a grandes perdas de carbono orgânico do solo (Solomon et al. 2002).

O solo da mata secundária apresentou maiores teores de COAM, semelhante ao sistema agrossilvipastoril, o que indica que a ação das raízes e da biota do solo em profundidades na translocação de C através da serapilheira fina e grossa (Marques et al. 2015).

O acúmulo de C em ambientes pastejados ocorre por três mecanismos: (i) estimulação do crescimento do sistema radicular e alocação de C no solo por pastejo com a taxa de lotação adequada (Bieluczyk et al. 2017); (ii) usar o gado como um catalisador do processo de ciclagem de nutrientes (Anghinoni et al. 2013; Assmann et al. 2017), devolvendo e redistribuindo a maioria dos nutrientes ingeridos para o solo por meio de fezes e urina prontamente disponíveis

para as plantas (Assmann et al. 2017); e, (iii) ao melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, através da cobertura vegetal permanente (Hok et al. 2018).

No agrupamento dos agrossistemas percebemos que o sistema agrossilvipastoril aproximou-se do ambiente menos antropizado, se distanciando do seu uso anterior que era a pastagem convencional. Nossos resultados mostraram que é possível recuperar áreas abandonadas e ou degradadas, decorrentes de desmatamento na Amazônia, por meio da introdução de sistemas agrossilvipastoris. Isso está diretamente relacionado à agregação mais intensa desses solos na superfície, enquanto os maiores teores da fração particulada estão diretamente relacionados à ação das raízes e folhas depositadas na superfície, promovendo proteção mecânica da matéria orgânica (Marques et al. 2015).

5 Conclusões

Entre os agrossistemas avaliados, o sistema agrossilvipastoril proporcionou incremento na fertilidade do solo e estabilização da matéria orgânica quando comparada a pastagem, assemelhando-se aos solos de mata secundária.

Em regiões tropicais, com solos frágeis, o sistema agrossilvipastoril representa uma ótima estratégia para recuperação ambiental das pastagens ou lavouras em sistema convencional.

6 Referências Bibliográficas

Alaoui A, Lipiec J, Gerke HH (2011) A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective. *Soil Tillage Res* 115:1-15 <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.06.002>

Anghinoni I, Carvalho, PCDF Valadão SE, Costa GA (2013) Abordagem sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no subtropical brasileiro. In: *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 325–380.

Assmann JM, Martins AP, Anghinoni I, Oliveira LG, Holanda G, Andrade SEVG, Pereira E, Silva RA, Balerini F, Faccio PC, Franzluebbbers AJ (2017) Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities insubtropics. *Nutr Cycl Agrossystems* 108:p.21–33. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9818-6>

Balbino LC, Cordeiro LAM, Oliveira P, Kluthcouski J, Galerani PR, Vilela L (2012) Agricultura sustentável por meio da Integração Lavoura-pecuária-floresta (ILPF). *Inform Agron* 138:1-14.

Bieluczyk W, Pereira MG, Guareschi RF, Andrade Bonetti J, Da Silva GN, Da Silva Neto EC (2017) Soil carbon and nitrogen stocks, light organic matter, and remaining phosphorus under a crop-livestock integration system. *Semin Agrar* 38:1825-1840. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n4p1825>

CAMBARDELLA CA, ELLIOTT ET (1992) Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci Soc Am J* 56(3):777-783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>

Carvalho, JLN, Cerri CEP, Feigel, BJ, Piccolo MC, Godinho VP, Cerri CC (2009) Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazil Amazon. *Soil Tillage Res* 103:342-349. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.022>

Cherubin MR, Franco ALC, Cerri CEP, Oliveira DMS, Davies CA, Cerri CC (2015) Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils-Effects of land use change on soil chemical attributes. *Agric Ecosyst Environ* 211:173-184. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.006>

Dias-Filho MB (2014) Recuperação de pastagens degradadas na Amazônia: desafios, oportunidades e perspectivas. In: SAMBUICHI RHR et al. (Org.). Políticas agroambientais e sustentabilidade: desafios, oportunidades e lições aprendidas. Brasília, DF: Ipea 149-169.

Durigan M, Cherubin M, De Camargo P, Ferreira J, Berenguer E, Gardner T, Cerri C (2017) Soil Organic Matter Responses to Anthropogenic Forest Disturbance and Land Use Change in the Eastern Brazilian Amazon. *Sustainability* 9(3):379 <https://doi.org/10.3390/su9030379>

Ferreira DF, Filho AC, Lucio, AD (2012) Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrição na casualização. *Bol Inf Soc Bras. de Ciênc Solo* 37(3):16-19.

Fischer C, Tischer J, Roscher C, Eisenhauer N, Ravenek J, Gleixner G, Attinger S, Jensen B, Kroon HD, Mommer L (2015) Plant species diversity affects infiltration capacity in an experimental grassland through changes in soil properties. *Plant Soil* 397:1-16. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2373-5>

Garcia US (2015) Avaliação dos atributos físicos, químicos e estoque de carbono do solo em diferentes ambientes em matas de babaçu, no estado do maranhão. Monografia, Universidade Estadual do Maranhão.

Hok L, De Moraes Sá JC, Reyes M, Boulakia S, Tivet F, Leng V, Kong R, Briedis C, Da Cruz Hartman D, Ferreira LA, Inagaki TM, Gonçalves DRP, Bressan PT (2018) Enzymes and C pools as indicators of C build up in short-term conservation agriculture in a savanna ecosystem in Cambodia. *Soil Tillage Res* 177:125-133. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.015>.

INMET Instituto Nacional de Meteorologia Normais (2021) Climatológicas dos municípios do Maranhão 2016-2020. Brasília. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> Acessado em 01 maio de 2021.

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2016) Projeto TerraClass: levantamento de informações de uso e cobertura da terra na Amazônia Legal brasileira – 2004-2014. São José

dos Campos. Disponível em: http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2014.php
Acessado em 01 maio de 2021.

Jensen JL, Schjonning P, Watts CW, Christensen BT, Obour PB, Munkholm LJ (2020) Soil degradation and recovery – Changes in organic matter fractions and structural stability. *Geoderma* 364:114181. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114181>

Köppen W (1948) *Climatologia*. Mexico: Fundo de Cultura Econômica: 466.

Marques JDDO, Luizão FJ, Teixeira WG, Sarrazin M, Ferreira SJF, Beldini TP, Marques EMDA (2015) Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central Amazonia. *Rev Bras Cienc Solo* 39:232-242. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20150142>

Moraes JFL, Volkoff B, Cerri CC, Bernoux M (1996) Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondonia. *Geoderma* 70:63-81. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00072-0)

Mutuo PK, Cadisch G, Albrecht A, Palm CA, Verchot L (2015) Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutr Cycl Agroecosyst* 71:43-54 <https://doi.org/10.1007/s10705-004-5285-6>

Quesada CA, Claudia P, Erick O, Mendoza O, Lawrence P, Gustavo S, JL (2020) Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. *Soil* 6:53-88. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Cunha TJF, Oliveira JB (2013) *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3ª ed. Revisada e ampliada. Brasília, Embrapa: 353.

Signor D, Deon MD, Camargo PB, Cerri CEP (2018) Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under. *Sci Agric* 75(3):225-232. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0089>

Signor D, Zani CF, Paladini AA, Deon MD, Cerri CEP (2014) Carbon stocks and quality of soil organic matter in sugarcane fields. *Rev Bras Cienc Solo* 38(5):1402-1410 <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500005>

Solomon D, Fritzsche F, Tekaling M, Lehmann J, Zech W (2002) Soil organic matter composition in the subhumid Ethiopian Highlands as influenced by deforestation and agricultural management. *Soil Sci Soc Am J* 66:68-82. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.6800>

Sun D, Yang H, Guan D, Yang M, Wu J, Yuan F, Jin C, Wang A, Zhang Y (2018) The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: A meta-analysis. *Sci Total Environ*, 626:1394–1401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.104>

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira, WG (2017) *Manual de análises de métodos de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, Embrapa: 574 p.

Veldkamp E (1994) Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Sci Soc Am J* 58:175-180 <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x>

YEOMANS JC, BREMNER, JM (1988) A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun Soil Sci Plant Anal* 19:1467-1476. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

Zhao Y, Wu P, Zhao S, Feng H (2013) Variation of soil infiltrability across a 79-year chronosequence of naturally restored grassland on the loess plateau, China. *J Hydrol* 504:94-103 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.039>

APÊNDICE A - Coeficientes de correlação (r) dos atributos do solo da camada 0-15 cm do capítulo II.

Atributos	Coeficiente de correlação (r)																															
	ESP	GR	GR100	PROD	COT	COP	COAM	RP	DS	MAC	MIC	PT	AG	AF	SIL	ARG	AT	pH	P	K	Ca	Mg	Al	Na	H+Al	T	CTC	V%				
ESP	1,00																															
GR	-0,30	1,00																														
GR100	-0,20	0,25	1,00																													
PROD	0,52	0,44	0,57	1,00																												
COT	-0,08	0,24	0,66	0,46	1,00																											
COP	0,03	-0,03	-0,21	-0,11	0,44	1,00																										
COAM	-0,11	0,28	0,86	0,58	0,71	-0,32	1,00																									
RP	-0,18	-0,17	-0,39	-0,44	-0,18	0,22	-0,36	1,00																								
DS	0,03	-0,06	0,07	0,03	0,10	0,10	0,02	0,02	1,00																							
MAC	-0,10	0,03	0,00	-0,06	-0,04	-0,08	0,02	0,02	-0,29	1,00																						
MIC	0,04	0,03	-0,10	-0,02	-0,09	-0,02	-0,08	-0,07	-0,63	-0,39	1,00																					
PT	-0,04	0,07	-0,07	-0,03	-0,09	-0,09	-0,02	-0,02	-1,00	0,28	0,63	1,00																				
AG	0,07	-0,09	-0,16	-0,09	-0,15	0,07	-0,21	0,04	0,06	-0,04	-0,03	-0,06	1,00																			
AF	-0,14	-0,07	-0,17	-0,24	-0,03	0,20	-0,18	0,14	-0,06	-0,05	0,04	0,06	-0,13	1,00																		
SIL	0,07	0,00	0,45	0,31	0,20	-0,26	0,42	-0,27	0,10	0,00	-0,07	-0,10	0,12	-0,49	1,00																	
ARG	0,15	0,08	-0,06	0,13	-0,10	-0,04	-0,08	-0,01	0,11	0,02	-0,04	-0,11	0,02	-0,27	-0,18	1,00																
AT	-0,13	-0,07	-0,18	-0,25	-0,04	0,21	-0,20	0,14	-0,06	-0,05	0,04	0,05	-0,06	1,00	-0,48	-0,28	1,00															
pH	-0,08	-0,38	-0,34	-0,46	-0,24	0,11	-0,34	0,27	0,06	-0,01	-0,06	-0,06	0,20	0,18	-0,12	0,01	0,19	1,00														
P	0,02	0,04	0,20	0,15	0,16	-0,12	0,27	-0,01	-0,02	-0,06	0,04	0,01	0,03	0,21	0,12	-0,19	0,22	-0,10	1,00													
K	-0,02	-0,17	-0,27	-0,25	-0,22	0,06	-0,28	0,17	0,04	-0,02	0,04	-0,04	-0,01	0,08	-0,12	-0,04	0,08	0,29	-0,03	1,00												
Ca	-0,11	0,13	0,45	0,26	0,38	-0,11	0,49	-0,16	0,04	-0,02	0,02	-0,03	-0,03	-0,03	0,14	-0,11	-0,03	-0,05	0,04	-0,17	1,00											
Mg	-0,01	0,07	0,34	0,24	0,11	-0,30	0,35	-0,11	0,05	-0,01	0,01	-0,05	-0,03	-0,16	0,16	0,06	-0,16	-0,07	0,09	-0,17	0,50	1,00										
Al	-0,15	0,15	0,07	0,00	0,06	-0,06	0,11	-0,07	0,07	0,02	-0,03	-0,06	-0,04	-0,09	-0,03	0,05	-0,09	-0,19	-0,15	-0,10	0,04	-0,08	1,00									
Na	0,01	-0,16	-0,28	-0,23	-0,23	0,06	-0,29	0,16	0,03	-0,04	0,04	-0,03	-0,02	0,06	-0,12	-0,01	0,06	0,30	-0,05	0,97	-0,18	-0,19	-0,10	1,00								
H+Al	-0,07	-0,05	-0,21	-0,20	-0,17	-0,10	-0,10	0,24	0,16	0,01	-0,12	-0,16	0,07	0,11	-0,13	0,08	0,12	0,02	0,21	0,18	-0,21	-0,04	0,03	0,14	1,00							
T	-0,08	0,05	0,34	0,19	0,20	-0,20	0,36	-0,09	0,06	-0,03	0,03	-0,06	-0,04	-0,07	0,12	-0,04	-0,07	0,05	0,06	0,23	0,80	0,77	-0,06	0,20	-0,08	1,00						
CTC	-0,10	0,03	0,27	0,12	0,14	-0,23	0,32	-0,01	0,11	-0,03	0,00	-0,12	-0,02	-0,03	0,07	-0,02	-0,03	0,06	0,12	0,28	0,72	0,74	-0,05	0,24	0,24	0,95	1,00					
V%	0,00	0,06	0,36	0,26	0,23	-0,07	0,30	-0,21	-0,07	-0,04	0,12	0,07	-0,06	-0,13	0,16	-0,05	-0,13	0,02	-0,14	0,00	0,69	0,54	-0,06	0,01	-0,73	0,72	0,47	1,00				

- Não significativo (p>0,05)
- Significativo (p<0,05)
- Muito significativo (p<0,01)
- Extremamente significativo (p<0,001)

APÊNDICE B - Coeficientes de correlação (r) dos atributos do solo da camada 15-30 cm do capítulo II.

Atributos	Coeficiente de correlação (r)																												
	ESP	GR	GR100	PROD	COT	COP	COAM	RP	DS	MAC	MIC	PT	AG	AF	SIL	ARG	AT	pH	P	K	Ca	Mg	Al	Na	H+Al	T	CTC	V%	
ESP	1,00																												
GR	-0,30	1,00																											
GR100	-0,20	0,25	1,00																										
PROD	0,52	0,44	0,57	1,00																									
COT	0,02	0,29	0,27	0,32	1,00																								
COP	-0,14	0,18	0,04	-0,02	0,62	1,00																							
COAM	0,17	0,17	0,28	0,40	0,59	-0,28	1,00																						
RP	-0,24	-0,15	-0,37	-0,45	-0,28	-0,14	-0,20	1,00																					
DS	0,03	-0,01	0,00	0,01	-0,18	-0,17	-0,04	0,04	1,00																				
MAC	-0,14	0,07	0,00	-0,09	0,11	0,08	0,05	0,02	-0,02	1,00																			
MIC	0,07	-0,04	0,00	0,05	0,06	0,07	0,00	-0,04	-0,71	-0,69	1,00																		
PT	-0,03	0,01	0,00	-0,01	0,18	0,17	0,04	-0,04	-1,00	0,02	0,71	1,00																	
AG	0,12	-0,12	-0,18	-0,07	0,00	-0,08	0,09	0,05	0,20	-0,17	-0,03	-0,20	1,00																
AF	0,02	-0,03	-0,11	-0,07	-0,06	-0,05	-0,03	0,04	-0,09	0,16	-0,04	0,09	-0,13	1,00															
SIL	0,19	-0,18	0,22	0,17	0,01	-0,02	0,04	-0,18	0,11	-0,03	-0,06	-0,11	0,04	-0,52	1,00														
ARG	0,05	0,05	0,14	0,16	-0,06	-0,05	-0,03	-0,10	0,17	-0,06	-0,08	-0,17	0,04	-0,46	0,05	1,00													
AT	-0,01	-0,03	-0,12	-0,09	-0,06	-0,07	-0,01	0,05	-0,07	0,14	-0,05	0,07	-0,08	0,98	-0,53	-0,46	1,00												
pH	-0,05	-0,39	-0,29	-0,43	-0,24	-0,11	-0,18	0,26	-0,10	0,11	-0,01	0,10	0,11	0,15	-0,15	-0,10	0,13	1,00											
P	-0,11	0,12	0,03	0,00	0,04	0,07	-0,02	0,03	0,00	0,12	-0,08	0,00	-0,08	0,14	0,09	-0,04	0,15	-0,13	1,00										
K	0,04	-0,13	-0,24	-0,16	-0,08	-0,04	-0,05	0,31	0,04	0,01	-0,03	-0,04	0,05	0,06	-0,16	0,04	0,06	0,22	-0,09	1,00									
Ca	0,29	0,01	0,00	0,26	-0,02	-0,14	0,13	-0,11	0,04	0,00	-0,03	-0,04	0,22	-0,20	0,07	0,30	-0,18	0,08	-0,21	0,06	1,00								
Mg	0,08	-0,05	-0,05	0,02	-0,07	-0,14	0,05	0,08	0,01	-0,02	0,01	-0,01	0,25	-0,24	0,04	0,12	-0,20	0,10	-0,26	0,05	0,37	1,00							
Al	-0,03	0,22	0,07	0,13	0,03	0,04	0,00	-0,12	0,06	-0,05	0,00	-0,06	0,03	-0,35	0,07	0,35	-0,34	-0,28	0,16	-0,09	0,06	0,05	1,00						
Na	0,09	-0,11	-0,27	-0,12	-0,11	-0,04	-0,09	0,31	0,02	0,07	-0,06	-0,02	-0,02	0,17	-0,19	-0,01	0,14	0,21	-0,06	0,87	0,08	-0,05	-0,21	1,00					
H+Al	-0,01	-0,12	-0,18	-0,19	-0,11	-0,02	-0,12	0,19	0,01	-0,13	0,08	-0,01	0,10	-0,29	0,15	0,23	-0,29	0,26	-0,12	0,10	0,01	0,06	0,16	-0,01	1,00				
T	0,21	-0,06	-0,09	0,10	-0,08	-0,17	0,08	0,07	0,03	0,00	-0,02	-0,03	0,28	-0,23	0,02	0,23	-0,20	0,16	-0,30	0,28	0,73	0,87	0,03	0,21	0,07	1,00			
CTC	0,20	-0,09	-0,13	0,05	-0,10	-0,17	0,05	0,11	0,03	-0,03	0,00	-0,03	0,29	-0,29	0,05	0,27	-0,26	0,21	-0,31	0,30	0,70	0,84	0,07	0,20	0,30	0,97	1,00		
V%	0,15	0,03	0,08	0,20	0,00	-0,12	0,13	-0,08	0,02	0,06	-0,06	-0,02	0,14	-0,02	-0,07	0,06	0,01	-0,07	-0,16	0,10	0,56	0,64	-0,07	0,13	-0,61	0,73	0,55	1,00	

- Não significativo (p>0,05)
- Significativo (p<0,05)
- Muito significativo (p<0,01)
- Extremamente significativo (p<0,001)