



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÔNOMICA

CAIO VINICIUS SALES PEREIRA DA MACENA

**CORRELAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO
COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO NA MICRORREGIÃO DE PINDARÉ-
MIRIM**

SÃO LUÍS – MA

2021

CAIO VINICIUS SALES PEREIRA DA MACENA

**CORRELAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO
COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO NA MICRORREGIÃO DE PINDARÉ-
MIRIM**

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

Orientador: Prof. Dr. Luciano Cavalcante Muniz.

Coorientador: MSc. Victor Roberto Ribeiro Reis

SÃO LUÍS – MA

2021

Macena, Caio Vinicius Sales Pereira da.

Correlação da matéria orgânica e atributos físicos do solo com a produtividade do milho na microrregião de Pindaré-Mirim / Caio Vinicius Sales Pereira da Macena. – São Luís, 2021.

49 f

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

Orientador: Prof. Luciano Cavalcante Muniz.

1.Agricultura de precisão. 2.Fertilidade do solo. 3.Intensificação da agricultura.
I.Título.

CDU: 633.15-145.2(812.1)

CAIO VINICIUS SALES PEREIRA DA MACENA

**CORRELAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO
COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO NA MICRORREGIÃO DE PINDARÉ-
MIRIM**

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

Aprovada em: 06 / 09 / 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano Cavalcante Muniz – Orientador
Departamento de Economia Rural/CCA/UEMA

Prof. Dr. Joaquim José Frazão - Examinador
Departamento de Engenharia Agrícola/CCA/UEMA

MSc. Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego - Examinador
Universidade Estadual do Oeste do Paraná/UNIOESTE

À minha formidável mãe, Maria Francineth Borba Sales e minha admirável tia (in memoriam) Maria Nazaré Borba Sales, por todo amor, dedicação, trabalho e por sonharem comigo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus por toda força e sabedoria para alcançar esta vitória.

À minha mãe, Maria Francineth, por sempre me incentivar a correr atrás dos meus sonhos e por suas orações constantes à meu favor;

À minha tia (*in memoriam*), Maria Nazaré, por ter me ensinado que a educação sempre é o melhor caminho.

Ao meu professor, orientador e amigo, Dr. Luciano Cavalcante Muniz, por todas as oportunidades que me deu, por sempre ter me tratado com respeito e por todas as palavras de motivação.

Ao meu coorientador, Victor Roberto Ribeiro Reis, pela paciência, ajuda e por todo conhecimento repassado.

À professora Dr.^a Maria Rosângela Malheiros e ao Dr. Raimundo Nonato Viana, por me ajudarem a dar os primeiros passos na pesquisa e por todo ensinamento compartilhado.

Ao Hidelbrando Pires, Mariane Peixoto, Maycon Pedrosa e Rodrigo Barbosa, por estarem presentes nos momentos mais difíceis dessa jornada, pois mais que amigos se tornaram irmãos.

Aos amigos que fiz ao longo do curso e a minha turma de 2016, em especial, Iago Três, Romão Neto, Mayara Menezes, Cleude Mayara, Tharcísio Campos, Ramon Batista, Rafael Neves, Matheus Barata, Dianny Regina, Abimael Carmo, Maria Izadora, Elimilton Brasil, Wallyson Santos, Carlos Rego, Daniel Diniz, Cintya Santos, Maria Karoline.

À todos integrantes do Grupo de Inovação em Sistemas Integrados de Produção – GINTEGRA, em especial à professora Dr.^a Valéria Xavier Apolinário e ao Dr. Joaquim Bezerra.

À Universidade Estadual do Maranhão – UEMA e todo seu corpo docente como também à todos os funcionários que são essenciais no dia-a-dia da instituição.

À FAPEMA pela concessão da bolsa de iniciação científica e o apoio financeiro para realização do projeto.

E todos os demais amigos que direta ou indiretamente me ajudaram a conquistar esta vitória.

MUITO OBRIGADO!

A fé é a certeza de que vamos receber as coisas que esperamos e a prova de que existem coisas que não podemos ver.

Hebreus 11:1

RESUMO

O trabalho objetivou avaliar a correlação espacial entre a qualidade da matéria orgânica e de atributos físicos do solo com o rendimento da cultura do milho, visando aumentar o potencial produtivo, em solos estruturalmente frágeis da Microrregião de Pindaré-Mirim. O experimento foi conduzido na Unidade de Referência Tecnológica – URT em ILPF da EMBRAPA Cocais e UEMA, no município de Pindaré-Mirim – MA, Brasil. Neste experimento foram avaliadas as variáveis físicas do solo que possuem correlação significativa com o aumento ou limitação da produção da cultura do milho. Foram determinados o carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e os atributos físicos do solo (densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade, resistência à penetração, umidade e composição granulométrica) e a produtividade do milho (número de espigas por planta, massa de 100 grãos e peso das espigas), em 119 pontos de amostragem, em uma grade uniforme de 72 m². A avaliação da produção foi realizada em 6m² ao redor de cada ponto de amostragem. As amostras deformadas foram coletadas em duas profundidades (0-15 e 15-30 cm) e para as coletas de solo não deformadas foram realizadas em uma minitrincheira de 30 cm, nas mesmas profundidades e mesmos pontos de amostragem. A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada no quarto dia após a chuva, com duas coletas por ponto de amostragem, juntamente com a coleta para determinação da umidade. As variáveis analisadas, em sua maioria apresentaram distribuição normal, em ambas profundidades. COT, COAM e silte, apresentaram correlação positiva com a produtividade, em contra partida, RP, areia fina, areia grossa apresentaram correlação negativa. Pela análise de regressão múltipla pelo método stepwise, as variáveis COAM e RP influenciaram a produtividade do milho, explicado pelo efeito sobre a zona de crescimento de raiz do solo e, conseqüentemente, sobre as raízes. Baseado nos mapas de isolinhas, verificou-se um comportamento semelhante entre a produtividade e o COAM na camada de 0-15 cm, e efeito inverso entre os teores de RP nas extremidades da área ao Norte e ao Sul. O COAM e a RP apresentaram correlação diferente com o rendimento do milho. A medida que aumentou os níveis de COAM, a produtividade do milho aumentou, no entanto, a produtividade da cultura diminuiu com o aumento da RP no solo.

Palavras-chaves: agricultura de precisão, fertilidade do solo, intensificação da agricultura.

ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the spatial correlation between the quality of organic matter and physical attributes of the soil with the yield of the corn crop, aiming to increase the yield potential in structurally fragile soils in the microregion of Pindaré-Mirim. The experiment was conducted at the Technological Reference Unit – TRU in ICLF of EMBRAPA Cocais and UEMA, in the municipality of Pindaré-Mirim – MA, Brazil. In this experiment, the soil physical variables that have a significant correlation with the increase or limitation of corn crop production were evaluated. Total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (COP), organic carbon associated with minerals (COAM) and soil physical attributes (soil density, total porosity, microporosity, macroporosity, resistance to penetration, moisture and composition) were determined. grain size) and corn yield (number of ears per plant, mass of 100 grains and ear weight), in 119 sampling points, in a uniform grid of 72 m². The production evaluation was carried out in 6m² around each sampling point. The deformed samples were collected at two depths (0-15 and 15-30 cm) and the undeformed soil collections were carried out in a 30 cm mini trench, at the same depths and at the same sampling points. The soil mechanical resistance to penetration was determined on the fourth day after the rain, with two collections per sampling point, together with the collection to determine moisture. The analyzed variables mostly showed normal distribution at both depths. COT, COAM and silt showed a positive correlation with productivity, on the other hand, RP, fine sand, coarse sand showed a negative correlation. By stepwise multiple regression analysis, the variables COAM and RP influenced maize yield, explained by the effect on the soil root growth zone and, consequently, on the roots. Based on the isoline maps, there was a similar behavior between yield and COAM in the 0-15 cm layer, and an inverse effect between RP contents in the northern and southern extremities of the area. different correlation with corn yield. As the levels of COAM increased, maize productivity increased, however, crop productivity decreased with increasing RP in the soil.

Keywords: precision agriculture, soil fertility, agricultural intensification.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Médias mensais dos dados históricos de precipitação pluviométrica (2011-2020) e temperatura e precipitação do experimento (2020) da região de Pindaré-Mirim, obtidos juntos ao Instituto Nacional de Meteorologia..... 19
- Figura 2. Implantação e condução do experimento. a) Aplicação de calcário e gesso; b) Plantio mecanizado do milho e c) Aplicação de herbicida.....21
- Figura 3. Desenho da área experimental mostrando a distribuição dos pontos de amostragem.21
- Figura 4. Condução do experimento. a) Marcação dos pontos amostrais; b) Colheita manual do milho para análise de produtividade e c) Lavoura de milho.....23
- Figura 5. 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.33
- Figura 6. Dispersão das variáveis explicativas e produtividade do milho: a) e b) Produtividade do milho e COAM, nas camadas 0-15 e 15-30 cm, respectivamente; c) e d) Produtividade do milho e resistência à penetração, nas camadas 0-15 e 15-30 cm, respectivamente.....35
- Figura 7. Distribuição espacial da produtividade do milho e suas variáveis preditoras: a) Produtividade do milho; b) e c) COAM nas profundidades 0-15 e 15-30 cm, respectivamente; d) e e) RP nas profundidades 0-15 e 15-30 cm.....38

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.	30
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.	34
Tabela 3. Parâmetros do semivariograma ajustados para produtividade, COAM e RP do solo nas profundidades 0-15 e 15-30 cm.	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Geral.....	14
2.2 Específicos	14
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.1 Características dos solos frágeis do trópico úmido.....	14
3.2 Fracionamento físico do carbono orgânico do solo	16
3.3 Fatores que influenciam a produtividade do milho	17
4 MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1 Localização, clima e solo da área de estudo	19
4.2 Histórico da área, implantação e condução do experimento.....	20
4.3 Coleta dos Componentes de Produtividade e Solo	21
4.4 Determinações analíticas	22
4.4.1 Avaliação dos componentes de produtividade.....	22
4.4.2 Avaliação das variáveis físicas do solo.....	23
4.4.3 Fracionamento físico da matéria orgânica	25
4.5 Análises estatísticas	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1 Análise descritiva dos resultados	28
5.2 Determinação das variáveis que influenciaram o rendimento do milho.....	32
6 CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da produção agrícola de alimentos é fundamental para atender segurança alimentar global e no Brasil. Estima-se que a população global alcance algo em torno de 9 bilhões até o ano de 2050, demandando até 70% mais alimentos (KING et al., 2017). De acordo com Noel et al. (2015), para assegurar a demanda global por alimento, a produção deve aumentar em 70% até 2050. É evidente que a produção de alimentos aumentou substancialmente em todo o mundo, no entanto, este período de intensificação agrícola foi acompanhado por consideráveis danos ambientais (PRETTY, 2018).

Assim, a demanda crescente por alimentos resulta em um aumento linear da pressão sobre os solos. Dessa forma, a transformação dos ecossistemas nativos em agroecossistemas produtivos, somada ao manejo inadequado da terra, pode comprometer consideravelmente os serviços ecossistêmicos fornecidos pelo solo, como serviços de regulação (sequestro de carbono, clima e regulamentos de gases de efeito estufa), serviços de abastecimento (produção de alimentos, água, combustível e fibra), serviços culturais (ecoturismo e recreação) e serviços de apoio, como a ciclagem de nutrientes (BALBINO et al., 2011; ADHIKARI; HARTEMINK, 2016). Além de causar a perda da sua qualidade física, química e biológica e influenciar na dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) (SALES et al., 2018; KOPITTKE et al., 2019; TROIAN et al. 2020). Conforme McBratney et al. (2017), o valor total estimado desses serviços ecossistêmicos prestados pelos solos é de USD 11,4 trilhões.

Se por um lado o manejo convencional do solo contribui fortemente para a não sustentabilidade da agricultura por outro lado a fragilidade intrínseca do solo diminui a resiliência dos solos. Na região do trópico úmido, os solos possuem baixa fertilidade natural (SENA et al. 2020), caracterizados pelos baixos teores de ferro livre e carbono orgânico e grandes quantidades de areia fina e silte (DANIELLS, 2012; HUANG et al., 2020). Nessas regiões, o acúmulo de matéria orgânica é prejudicado pelo revolvimento anual do solo para sua descompactação e pela presença quase constante de umidade e temperatura propícias à decomposição (DE MOURA et al., 2018).

Em sistemas produtivos, conforme relatado por Cherubin et al. (2015), a avaliação da qualidade do solo por meio do monitoramento das suas variáveis físicas, químicas e biológicas é fundamental para a sustentabilidade produtiva dos ambientes, pois fornece subsídios para a escolha de práticas de manejo que permitem a conservação dos ecossistemas. Portanto, dentre as técnicas para verificar alterações nas variáveis do solo, a análise geoestatística é uma das mais eficazes (ALHO et al. 2014), pois permite a quantificação do

grau de autocorrelação espacial entre as propriedades ambientais e posterior utilização para a previsão de valores em locais não medidos (KUMAR; SINGH, 2016). Dessa maneira, a variabilidade espacial permite a compreensão dos mecanismos e dos processos que controlam os padrões espaciais (BERNARDI et al., 2016).

De acordo com Carvalho et al. (2010) e Troian et al. (2020), a MOS desempenha papel fundamental nas funções do solo e pode indicar alterações do ambiente edáfico, através das formas de carbono orgânico predominantes, que variam de acordo com as práticas de manejo aplicadas. A prática do preparo do solo afeta a distribuição e a estabilidade dos agregados ao longo do tempo (SITHOLE; MAGWAZA; THIBAUD, 2019). No entanto, a matéria orgânica do solo serve como um importante agente de ligação de partícula de minerais em agregados enquanto, por outro lado, os agregados do solo protegem a MOS de decomposição rápida pelos microrganismos e atua como um armazenamento de carbono e outros nutrientes importantes do solo (ELLIOTT, 1986; MOTTIN, 2019).

Em virtude da sua importância, o fracionamento físico-granulométrico da MOS tem sido estudado como indicador de qualidade do solo. Conforme Carmo et al. (2012), a partir do fracionamento físico-granulométrico da MOS, se pode obter duas frações orgânicas: o carbono orgânico particulado (COP) – retido na porção da areia e é composto, principalmente, por resíduos de plantas, em processo de decomposição; e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM) - retido nas frações silte e argila.

As variáveis físicas do solo, como a resistência à penetração, densidade e porosidade estão correlacionados ao bom desenvolvimento e estabelecimento das culturas (SILVEIRA et al., 2010; BAQUERO et al., 2012) e com processos hidrológicos, tais como: a erosão, aeração, escoamento, taxa de infiltração e capacidade de retenção de água (SCHOENHOLTZ et al. 2000), apresentando variação espacial e temporal devido às suas complexidade e dinamicidade no sistema (BRADY; WEIL, 2013).

Dessa forma, compreender os impactos ambientais da produção agrícola global e como obter maiores rendimentos com impactos menores requer avaliações quantitativas da demanda futura de alimentos e como as diferentes práticas de produção afetam os rendimentos e as variáveis ambientais (TILMAN et al., 2011).

Dado à necessidade de entender a variabilidade espacial das frações físicas do carbono do solo e os atributos físicos do solo nas condições de clima e solo da Microrregião de Pindaré-Mirim, este trabalho parte da hipótese de que as frações físicas mais estáveis do carbono orgânico e a resistência à penetração do solo possuem maior influência na composição da produtividade do milho. Portanto, a confirmação dessa hipótese poderá

subsidiar programas de gestão de manejo do solo ao esclarecer o real impacto do carbono orgânico e dos atributos físicos do solo na produtividade agrícola, na região de Pindaré-Mirim.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a correlação espacial entre a qualidade da matéria orgânica e das variáveis físicas do solo com o rendimento da cultura do milho, visando aumentar o potencial produtivo, em solos estruturalmente frágeis da Microrregião de Pindaré-Mirim.

2.2 Específicos

Definir a magnitude da influência da qualidade da matéria orgânica e das variáveis físicas do solo no rendimento do milho;

Estabelecer a correlação espacial entre as variáveis do solo e o rendimento do milho.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Características dos solos frágeis do trópico úmido

De forma geral, os solos do trópico úmido são caracterizados pela baixa fertilidade natural, pelos elevados teores de areia fina e silte (15 – 20%) e argila (10 – 15%), e baixos níveis de matéria orgânica, principalmente os solos da Formação Itapecuru, os quais são formados a partir de rochas sedimentares e minerais de quartzo-arenito (AGUIAR et al., 2010; CORRÊA-MARTINS et al., 2019; SENA et al., 2020; HUANG et al., 2020). Diante disso, esses solos têm predisposição à fragilidade estrutural, devido ao baixo conteúdo de matéria orgânica, geralmente inferior a 4% e aos baixos teores de óxidos de ferro e alumínio (CELENTANO et al., 2016; RITTL; OLIVEIRA; CERRI, 2017; SIGNOR et al., 2018) e também, pela dificuldade em estocagem de carbono e estabilidade de agregados (BAYER et al., 2006).

Além disso, o clima tropical, caracterizado por altas temperaturas e altos índices pluviométricos tornam os solos altamente intemperizados e favorece a decomposição da

matéria orgânica (KAY, 2018). Segundo Glaser, Lehmann e Zech (2002), a baixa fertilidade química resulta da reduzida disponibilidade de nutrientes em solos dominados por argilas de baixa atividade, que tem baixa capacidade de reter nutrientes sob alta intensidade de chuva, o que leva a uma alta taxa de perda de nutrientes por lixiviação.

Por outro lado, a menor qualidade física do solo, deve-se ao endurecimento, que ocorre durante os ciclos de umedecimento e secagem do solo devido à redução da matéria orgânica do solo, quando é feito uso contínuo em solos com baixo teor de ferro (DANIELLS, 2012), o que aumenta os níveis de compactação do solo. Para Tretin et al. (2018), a compactação é um dos principais fatores limitantes para a obtenção do potencial máximo de produtividade em áreas de lavoura sob sistemas de preparo convencionais, pois acaba prejudicando o crescimento radicular da cultura.

Desse modo, as condições de clima tropical somadas aos solos coesos da região norte do Maranhão, prejudicam a capacidade de enraizamento das plantas, reduz o volume de solo acessado pelas raízes, prejudica a absorção e eficiência do uso de água e nitrogênio (DANIELLS, 2012; SENA, 2020). Além disso, a ação antrópica contribui para fragilidade dos solos tropicais, tendo em vista o manejo de corte e queima comumente empregado na agricultura maranhense. De acordo com Leite et al. (2016), a agricultura itinerante ou de corte e queima, consiste na conversão de florestas nativas em áreas agrícolas pelo uso do fogo, no qual a vegetação é cortada e queimada para realização do plantio de culturas agrônômicas sobre as cinzas. No entanto, quando o solo se torna infértil, o agricultor migra para novas áreas, o que expõe fisicamente o solo e elimina a cobertura vegetal (DE MOURA et al., 2018).

Outro manejo frequentemente empregado pelo agricultor maranhense é o preparo da terra através do revolvimento mecânico anual do solo, o que expõe a matéria orgânica a decomposição (MOUSSADEK et al. 2014). Isso acontece devido ao favorecimento da oxigenação no processo de aração, e logo após, ocorre o rearranjo das partículas e recompactação do solo abaixo da profundidade de maior volume radicular (BERISSO et al., 2013; REICHERT, et al., 2016). Portanto, o manejo do solo é fundamental para a sustentabilidade agrícola em solos altamente intemperizados. A conversão de florestas para agropecuária, modifica a dinâmica da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes no bioma Amazônico, diminuindo a capacidade produtiva do solo com o tempo, dependendo do manejo estabelecido (RODRIGUES et al., 2017).

3.2 Fracionamento físico do carbono orgânico do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) compreende componentes vivos, como raízes de plantas e organismos do solo e não-vivos, constituída de resíduos de plantas em diferentes estágios de decomposição, como as substâncias humificadas e as não humificadas (PRIMO; MENEZES; SILVA, 2011). A MOS desempenha papel fundamental nas funções do solo (BALBINO et al., 2011) por apresentar forte correlação com quase todas as características químicas e biológicas do solo, exercendo forte influência na sua capacidade produtiva, na nutrição das plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006) e na estrutura do solo (SALES et al., 2018).

Segundo Espindola (2019) o carbono representa 58% da MOS, por isso, a determinação dos teores de carbono no solo pode ser utilizada para estimar a quantidade da fração orgânica no solo. O carbono orgânico está diretamente ligado à qualidade do solo, pois atua como agente cimentante da estrutura, no tamponamento do pH, na complexação de elementos e na capacidade de troca de cátions, além de aumentar a disponibilidade hídrica no solo (CAMPOS et al., 2016).

Conforme Teixeira et al. (2017), o fracionamento físico é utilizado para identificar a distribuição do carbono orgânico em diversos compartimentos com dinâmicas e funções definidas, e assim avaliar a sua qualidade, sendo mais útil para estudar a ciclagem do carbono no solo. Dessa forma, Christensen (1992) considera que a matéria orgânica pode ser dividida em livre ou fracamente associada às partículas de solo (matéria orgânica não complexada) ou fortemente ligada às partículas minerais (formando complexos organominerais).

De acordo com Pinto et al. (2020), o fracionamento granulométrico da MOS consiste na separação de duas frações orgânicas: o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM). O COP é a fração da MOS separada por dispersão e peneiramento do solo associada fração areia ($COP > 53\mu m$), sendo caracterizado por partículas cuja permanência no solo está condicionada à proteção física desempenhada por agregados (GOLCHIN et al., 1994). O COAM é a fração da MOS associada às frações silte e argila do solo ($COAM < 53\mu m$), sendo definida como a fração da MOS que interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organominerais, estando protegido pelo mecanismo de proteção coloidal (CHRISTENSEN, 1996).

De acordo com Espindola (2019), o COP tem como principal função ser fonte energética e de nutrientes para os organismos, o que favorece a formação e estabilização dos agregados, elevação de cargas e transformações bioquímicas dos elementos no solo. Por outro

lado, o COAM é menos impactado pelo manejo do solo em curto prazo sendo conservado através de agentes complexantes, podendo se estabilizar em camadas superficiais, mas principalmente nas camadas profundas do solo devido à proteção coloidal através da formação de complexos organominerais (CARMO et al., 2012; SANTOS et al., 2012).

Dessa forma, as frações físicas da MOS (carbono orgânico particulado e carbono associado aos minerais) podem proporcionar um bom indicador para avaliar a capacidade dos sistemas de manejo em melhorar a qualidade do solo (LOSS et al., 2011).

3.3 Fatores que influenciam a produtividade do milho

A cultura do milho (*Zea mays* L.) foi cultivada em mais de 452 mil hectares na safra 2019/2020 no Maranhão, com produtividade média de 4,8 t/ha (CONAB, 2021a). No entanto, de acordo com Vian et al. (2016), a produtividade de grãos de milho pode estar associada a uma gama de fatores que interagem de forma complexa e condicionam a expressão da cultura. Além disso, os autores ressaltam que o estudo da variabilidade espacial das variáveis do solo, planta e da produtividade da cultura é fundamental para o entendimento dos fatores que determinam a expressão do potencial produtivo da cultura do milho e sua variabilidade em uma área agrícola, o que pode levar ao desenvolvimento de práticas de manejo sítio-específicas, que visam à maximização do potencial produtivo em diferentes zonas da lavoura.

O crescimento e a produtividade das safras são fortemente influenciados por vários fatores bióticos e abióticos e qualidade do solo (THALMANN; SANTELIA, 2017). Para Balbinot et al. (2005), densidade de semeadura, população final de plantas, número de espigas por planta, comprimento de espigas, número de fileiras de grãos por espiga, número de grãos por fileira, massa média do grão, são determinantes para produtividade de grãos de milho. Além disso, o material genético foi identificado como fator mais importante que influencia na produtividade da cultura do milho (MIAO; MULLA; ROBERT, 2006).

A qualidade do solo é essencial para expressão do potencial produtivo das culturas agrícolas. Porque a maximização da produção é alcançada quando há disponibilidade adequadas de água, nutrientes e oxigênio, o qual está direta ou indiretamente, influenciada pela estrutura do solo (SECCO et al., 2005; SANTOS et al., 2006). Quando o solo é submetido ao uso agrícola, suas propriedades físicas sofrem alterações, as quais geralmente são desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas (SPERA et al., 2004; WELTER, 2019). Desse modo, Cruz et al. (2003), levando em conta a perda de suas características desejáveis como sua degradação, pode haver diminuição de produtividade devido à perdas de

quantidades de nutrientes, matéria orgânica, mudanças em atributos físicos e outras consequências adversas.

Dessa forma, em solo tropical intemperizado, a perda da qualidade física do solo resulta em condições que restringem o desenvolvimento e produção das culturas vegetais, pois implica em condições desfavoráveis à estruturação do solo, como a formação de agregados pouco estáveis, elevada densidade, maior resistência à penetração das raízes (LIMA et al., 2013). Conforme os resultados de Rossetti e Centurion (2013), a resistência à penetração mecânica do solo apresentou relação linear decrescente com a produtividade de milho.

O que reflete na absorção de nutrientes, em que, de acordo com Sena et al. (2020), em condições tropicais úmidas, a eficiência do uso do nitrogênio é geralmente baixa, devido as altas temperaturas que elevam as taxas de volatilização (VIERO et al., 2014) e altas taxas de precipitação que aumentam a lixiviação (JABLOUN et al., 2015). Além da diminuição do volume de solo enraizável, pelo seu endurecimento, que ocorre através do ciclo de secagem e umedecimento do solo (DE MOURA et al., 2018).

Entretanto, o acúmulo de material orgânico, nas regiões do trópico úmido, que poderia diminuir os efeitos adversos da coesão do solo na região da raiz, é afetado por condições que aceleram a decomposição do material acumulado (HIJBEEK et al., 2018). Portanto, a aplicação de biomassa para aumentar os teores de matéria orgânica no solo vem sendo recomendado para essas regiões. A combinação de biomassa de leguminosa com fertilizante mineral (ureia), Aguiar et al. (2019), alcançaram 4,1 ton/ha e Sena et al. (2020) conseguiram 4,5 ton/ha de rendimento da cultura do milho, enquanto que, os tratamentos apenas com a adição de fertilizante mineral, obteve 0,6 ton/ha e 2,6 ton/ha, de modo respectivo.

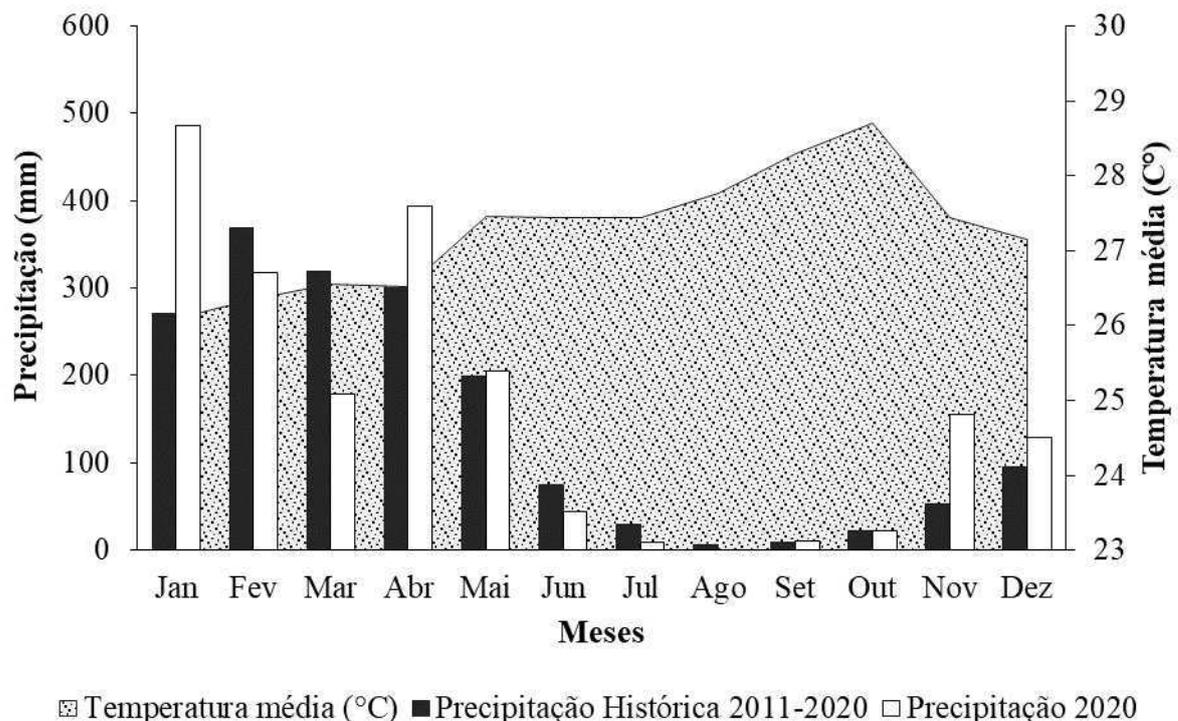
Além disso, pesquisas de Usowicz e Lipec (2017), em solos arenosos, constataram que o rendimento de grãos de cereais foram correlacionados significativa e positivamente com a capacidade de troca catiônica do solo e do subsolo, conteúdo de água e argila do solo superficial e teor de carbono orgânico do subsolo, e negativamente correlacionado com a densidade aparente do solo superficial. Portanto, segundo Montanari et al., (2015), pesquisas que busquem esclarecer relações entre os atributos físicos e químicos do solo com os componentes de produtividade da cultura são de extrema relevância para tomada de decisão quanto às práticas de manejo do solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização, clima e solo da área de estudo

O experimento foi conduzido na Unidade de Referência Tecnológica – URT em ILPF da EMBRAPA Cocais e UEMA, 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. O clima da região é do tipo Aw, segundo Köppen (1948), caracterizado por possuir um clima tropical chuvoso com nítida estação seca e com uma média de precipitação de 2.100 mm ano⁻¹. A temperatura mínima da região é de 23 °C, a máxima de 37 °C e a temperatura média é de aproximadamente 27 °C (Figura 1).

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



Fonte: Adaptado de INMET, 2021.

Geologicamente, o município encontra-se na Formação Itapecuru, formada no Cretáceo Superior (SANTOS; LEMOS, 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.). Antes da implantação do experimento, foi realizada uma coleta de solo para caracterização da composição granulométrica e fertilidade química do solo até 20 cm, resultando em: pH (H₂O) = 4,0; P = 1,51 mg dm⁻³; K = 0,60 cmol_c cm⁻³; Na = 0,08 cmol_c cm⁻³; Ca = 3,27 cmol_c cm⁻³; Mg²⁺ = 5,33 cmol_c cm⁻³; Al = 0,25 cmol_c cm⁻³; H + Al = 5,39 cmol_c cm⁻³ e 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).

4.2 Histórico da área, implantação e condução do experimento

A área do experimento consistiu de 1 ha⁻¹ de pastagem convencional, cultivada com a espécie *Urochloa brizantha* cv. Marandu há mais de 15 anos, com superpastejo extensivo de bovinos de corte e sinais de degradação acentuada.

De acordo com o resultado da análise de solo aplicou-se o cálculo da necessidade de calagem e gessagem, resultando na incorporação de 1 ton. ha⁻¹ de calcário calcítico e 0,70 ton. ha⁻¹ de gesso agrícola (Figura 2). Aos 40 dias após a correção do solo foi realizado o plantio do milho híbrido Biomatrix BM709 PRO2, tolerante à insetos da ordem lepidóptera e ao herbicida glifosato. O espaçamento utilizado entre plantas e entre linhas foi de 0,5 m, com a densidade de 72.000 plantas por ha⁻¹. Para adubação de plantio utilizou-se 370 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 5- 25-15 e 120 kg ha⁻¹ de N (ureia) em cobertura quando a planta apresentou 7 folhas totalmente desenvolvidas. Para o controle de plantas daninhas foi realizado o controle químico com aplicação de herbicidas 3 L ha⁻¹ de glifosato e 5 L ha⁻¹ de atrazina. Para o controle de insetos e doenças fúngicas foi aplicado, respectivamente, 130 mL ha⁻¹ de Lambda-cialotrina e 200 mL ha⁻¹ azoxistrobina.

Figura 2. Implantação e condução do experimento. a) Aplicação de calcário e gesso; b) Plantio mecanizado do milho e c) Aplicação de herbicida.

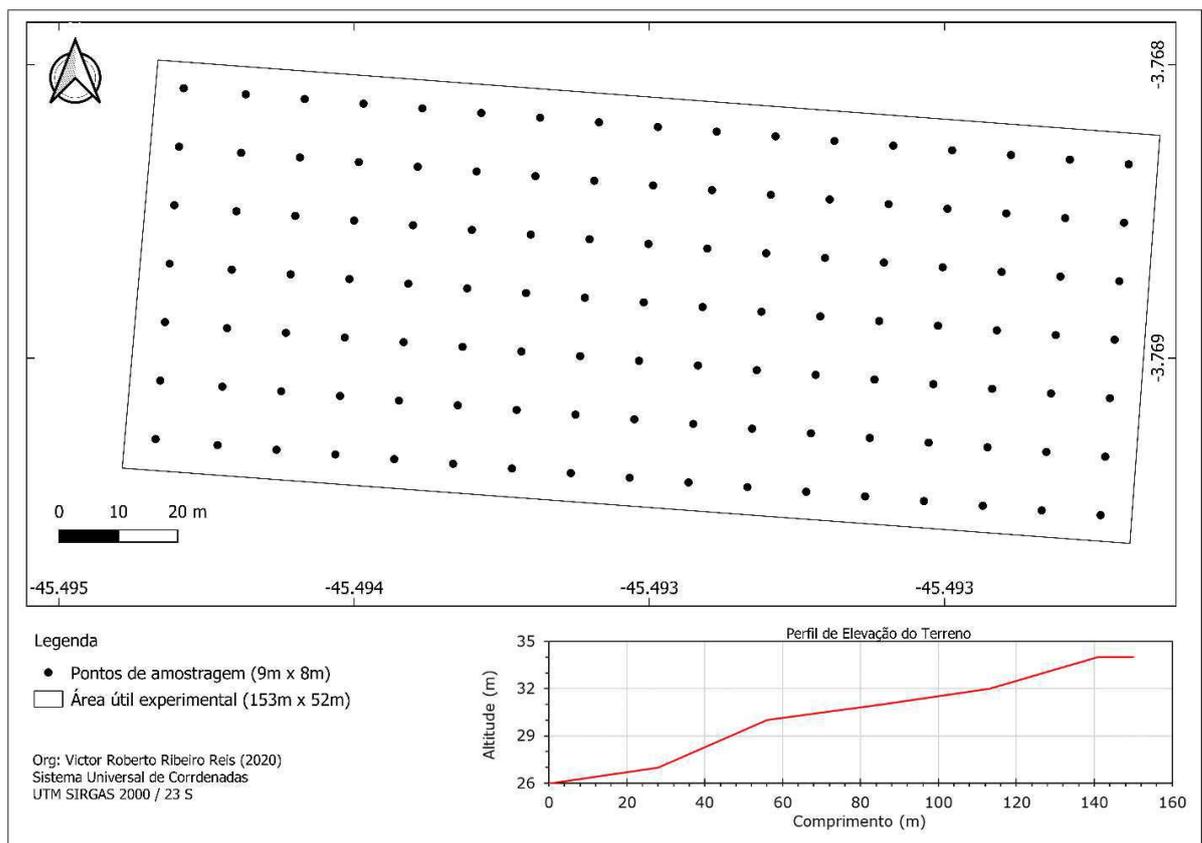


Fonte: BATISTA; CAMPOS; MACENA, 2020.

4.3 Coleta dos Componentes de Produtividade e Solo

Para determinar a variabilidade espacial das frações físicas do carbono, as variáveis físicas do solo e a produtividade do milho foram delimitados 119 pontos de amostragem georreferenciados, em uma grade uniforme de 9 m x 8 m. A área útil correspondente foi de 8.568 m², acrescida de uma bordadura de 1.432 m², totalizando uma área experimental de 10.000 m² (Figura 3).

Figura 3. Desenho da área experimental mostrando a distribuição dos pontos de amostragem.



Para avaliação da produção de milho foram delimitados 6 m² (3m x 2m) para coleta ao redor de cada ponto de amostragem.

Para coleta de amostras deformadas de solo, foram coletadas oito amostras simples ao redor de cada ponto, distribuídos de forma equidistante na direção dos pontos cardeais e em dupla, com uma distância de dois metros entre pontos da mesma direção. As amostras foram coletadas na floração, em duas profundidades (0-15 e 15-30 cm) com uso de trado holandês. Em campo, essas amostras simples foram homogeneizadas em uma única amostra composta por ponto.

Para as coletas de solo não deformada foi aberta minitrincheira de 30 x 30 x 30 cm, próxima a cada ponto de amostragem, em que foram coletadas as amostras em uma das paredes com anéis volumétricos de Kopeck de 100 cm³ nas profundidades de 0-15 e 15-30 cm, fixado perpendicular à trincheira. Ainda em campo, após o término da coleta das amostras, retirou-se o excesso de solo que passava dos anéis, com auxílio de um canivete e faca. Posteriormente, os anéis foram enrolados com plástico filme e transportados em caixas de papelão para evitar possíveis danos e deformações.

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®. Para determinação da umidade do solo, foram coletadas nas profundidades de 0-15 e 15-30 cm duas amostras deformadas de solo por ponto amostral, utilizando o trado holandês.

4.4 Determinações analíticas

4.4.1 Avaliação dos componentes de produtividade

A produtividade do milho foi avaliada na fase de colheita a partir das plantas coletadas em uma área de 6 m², ao redor de cada ponto amostral, pelo número de espigas por planta (obtida pela quantidade média de espigas de 15 plantas); e massa 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), de acordo com a metodologia proposta por Fageria et al. (1989) (Figura 4).

Figura 4. Condução do experimento. a) Marcação dos pontos amostrais; b) Colheita manual do milho para análise de produtividade e c) Lavoura de milho.



Fonte: BATISTA; MACENA, 2020.

4.4.2 Avaliação das variáveis físicas do solo

As variáveis físicas do solo, densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade, resistência mecânica à penetração, umidade gravimétrica e composição granulométrica, foram determinados no Laboratório de Física do solo da Universidade Estadual do Maranhão de acordo com o procedimento de análise descrito por Teixeira et al. (2017).

As amostras não deformadas foram devidamente saturadas em bandejas plásticas com água até 2/3 da altura dos anéis. Com a finalidade de evitar perda de solo, utilizou-se um tecido sintético, que permitiu apenas a passagem de água, em um dos lados de cada anel, que foi fixado com uma liga de borracha. Após 24 horas de imersão das amostras, quando todos os poros do solo estavam ocupados com água, as amostras foram pesadas e colocadas na mesa de tensão equilibrada a 6 kPa e, em seguida, foram pesadas. Depois de pesadas, cada repetição foi seca em estufa de circulação fechada a 105 °C por 24 horas ou até atingir massa constante.

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

$$D_s = \frac{m_a}{V} \quad (1)$$

Em que:

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

m_a – massa da amostra de solo seco a 105 °C até peso constante, em g.

V – volume do cilindro, em cm^3 .

A microporosidade (M_i) – poros menores que 0,05 mm, foi calculada utilizando o teor de água retido nas amostras equilibradas a 6 kPa. As amostras saturadas foram colocadas sob a mesa de tensão a qual retira a água dos macroporos. Após pesagem, antes e depois de ir à estufa a 105 °C, obtém-se o volume de macro e microporos contidos na amostra (TEIXEIRA et al., 2017). Para a determinação da microporosidade, utilizou-se equação (2):

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

Em que:

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

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

b – massa do solo seco a 105 °C, em g.

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

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

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

Em que:

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

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

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

Assim, conhecendo a P_t e a M_i calculou-se a macroporosidade (M_a) – poros maiores que 0,05 mm, através da diferença entre porosidade total e microporosidade, conforme equação 4:

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

Em que:

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

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

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

Para a determinação da resistência mecânica do solo à penetração, utilizou-se um penetrômetro digital (Falker) com graduações de 1 cm, que apresenta haste de metal e ponta em forma de cone (ângulo de 30°). Os dados foram armazenados automaticamente. De forma simultânea, para determinação da umidade do solo, foram coletadas duas amostras deformadas de solo por ponto, nas profundidades 0-15 e 15-30 cm, com auxílio do trado holandês, e determinada pelo método gravimétrico.

A composição granulométrica foi determinada através da distribuição do tamanho das partículas de solo pelo método da pipeta, o qual consiste na dispersão mecânica e estabilização da amostra por meio de agitador em uma solução dispersante adequada. Em seguida, faz-se a separação das frações por peneiramento e sedimentação. Em que após a secagem da terra fina ao ar livre (TFSA) e dispersão em solução de hidróxido de sódio, a composição granulométrica foi obtida pela relação entre os teores de argila (partículas menores que 0,002 mm), silte (partículas entre 0,002 e 0,050 mm), areia fina (partículas entre 0,050 e 0,200 mm) e areia grossa (partículas entre 0,200 e 2,000 mm).

4.4.3 Fracionamento físico da matéria orgânica

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

Logo depois, o tubo foi levado ao bloco digestor e pré-aquecido a 170°C , por 30 minutos. Após esse tempo, deixou-se o tubo esfriar durante 15 minutos, e todo o conteúdo foi transferido para um béquer graduado (100 mL), usando água destilada para elevar o volume final a 80 mL. Aguardou-se o esfriamento da solução à temperatura ambiente. Posteriormente, foi adicionado 3 gotas de solução indicadora 1,465 g de ortofenantrolina mono-hidratada e 0,695 g de sulfato ferroso (FeSO_4) dissolvidos em 100 mL de água destilada, seguindo-se a titulação com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ (sal de Mohr) e anotando o volume gasto

após viragem da cor. Procedimento idêntico foi repetido para três amostras-controle (“branco”), sem solo, aquecidas e não aquecidas. A amostra não aquecida será utilizada para calcular a quantidade de dicromato perdida pelas amostras aquecidas.

O resultado foi obtido através das equações 5 e 6:

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

Em que:

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

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

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

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

Em que:

CO = Carbono orgânico total (g/kg);

3 = resultado da relação entre o número de mols de Cr_2O_7 - que reage com Fe^{2+} multiplicado pelo número de mols de Cr_2O_7 - que reagem com o CO, multiplicado pela massa atômica do C;

1000 = fator de conversão de unidade ($mg \cdot mg^{-1}$ para $g \cdot kg^{-1}$).

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

Foram pesados 10 gramas de solo seco ao ar peneirados em malha de 2 mm e potes de polietileno de 100 ml, e adicionados de 40 mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio na concentração de 5 g L^{-1} . Em seguida, as amostras foram submetidas à agitação horizontal por 15 horas e passada em peneira de 0,053 mm com o auxílio de jato de água destilada até remoção total da argila. O material particulado retido na peneira, que consiste no carbono orgânico particulado (COP), associado à fração areia, foi transferido para potes de

alumínio, com auxílio de jatos de água, e seco em estufa de circulação forçada a 60 ° C. Após a secagem, o material foi pesado e determinou-se assim a massa da fração particulada.

Em seguida, moído em gral de porcelana e analisado em relação ao teor de carbono orgânico, conforme descrito para o COT. O material que passou pela peneira de 0,053 mm, consiste no carbono orgânico associado aos minerais (COAM) das frações silte e argila. Dessa forma, o COAM foi determinado através da diferença entre o COT e COP pela equação 7:

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

Em que:

COT = carbono orgânico total, em g kg;

COP = carbono orgânico particulado, em g kg⁻¹.

4.5 Análises estatísticas

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.

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.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise descritiva dos resultados

A estatística descritiva para as variáveis que influenciaram a produtividade do milho é apresentada na Tabela 1, para as respectivas camadas 0-15 e 15-30 cm.

As medidas de média e mediana, mostraram valores muito próximos para maioria dos atributos e em suas respectivas camadas, o que indica uma distribuição simétrica e normal. Isso pode ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição (CAMBARDELLA et al., 1992).

Quanto à normalidade dos componentes de produtividade, constatou-se que a quantidade de grãos por espiga, o peso de 100 grãos e a própria produtividade apresentaram distribuição normal ($p > 0,05$). Além disso, com exceção da variáveis físicas do solo, resistência à penetração, areia grossa, em ambas profundidades e; silte na camada 15-30 cm, e a fração do carbono associada aos minerais (COAM) na camada 15-30 cm, as demais variáveis analisadas ajustaram-se à distribuição normal determinada por meio do teste de Shapiro-Wilk.

Portanto, mesmo que tenha ocorrido distribuição não-normal para algumas das variáveis analisadas, isso não foi um problema para utilização da krigagem ordinária. Por outro lado, a normalidade dos dados não é um pressuposto necessário para a aplicação de técnica geoestatística, mas sim que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer a análise (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; CRESSIE, 1991). Essa ocorrência de dados não normais de algumas variáveis, pode ser atribuída a heterogeneidade intrínseca do solo, por exemplo material de origem e intemperização, erros na amostragem ou a heterogeneidade da área de estudo, devido ao impacto causado pelo manejo anterior à instalação do experimento por meio da ação de fatores externos que promovem a alteração do solo.

Com base no critério de Warrick e Nielsen (1980) para classificar o coeficiente de variação – CV (baixo – $CV < 12 \%$, médio – $12 \% < CV < 60 \%$, alto – $CV \geq 60 \%$), verificou-se que em ambas profundidades (0-15 cm e 15-30 cm) as variáveis que influenciam o rendimento do milho e os componentes de produtividade, areia fina, areia grossa, número de espigas por m^{-2} e produtividade são classificadas como baixo e, silte, COT, grãos por espiga e

peso de 100 grãos apresentaram CV de nível médio. Em contrapartida, as variáveis RP, COAM, apresentaram CV alto, em pelo menos uma das profundidades.

Tabela 1. Parâmetros da estatística descritiva das variáveis físicas do solo e componentes de produtividade do milho em região de solo estruturalmente frágil.

Continua

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
Variáveis físicas do solo					0-15cm				
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
Frações de carbono									
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

Tabela 1. Parâmetros da estatística descritiva das variáveis físicas do solo e componentes de produtividade do milho em região de solo estruturalmente frágil

Variáveis físicas do solo	15-30cm								Conclusão
	RP (Mpa)	0,47	4,65	1,49	1,41	0,59	0,77	51,45	
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
Frações de carbono									
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

5.2 Determinação das variáveis que influenciaram o rendimento do milho

Houve correlação significativa entre as seis variáveis analisadas (COT, COAM, RP, silte, areia fina, areia grossa) em pelo menos uma das profundidades com a produtividade do milho, principalmente, as frações do carbono orgânico e RP (Figura 5). O COAM ($r = 0,58$) e o COT ($r = 0,46$) apresentaram correlação direta nas duas profundidades (0-15 e 15-30 cm) e silte apenas na maior profundidade (15-30 cm). Por outro lado, RP ($r = 0,45$ e $r = 0,44$) apresentou efeito inverso em ambas profundidades, enquanto que, areia fina e areia total apenas na camada superficial (0-15 cm).

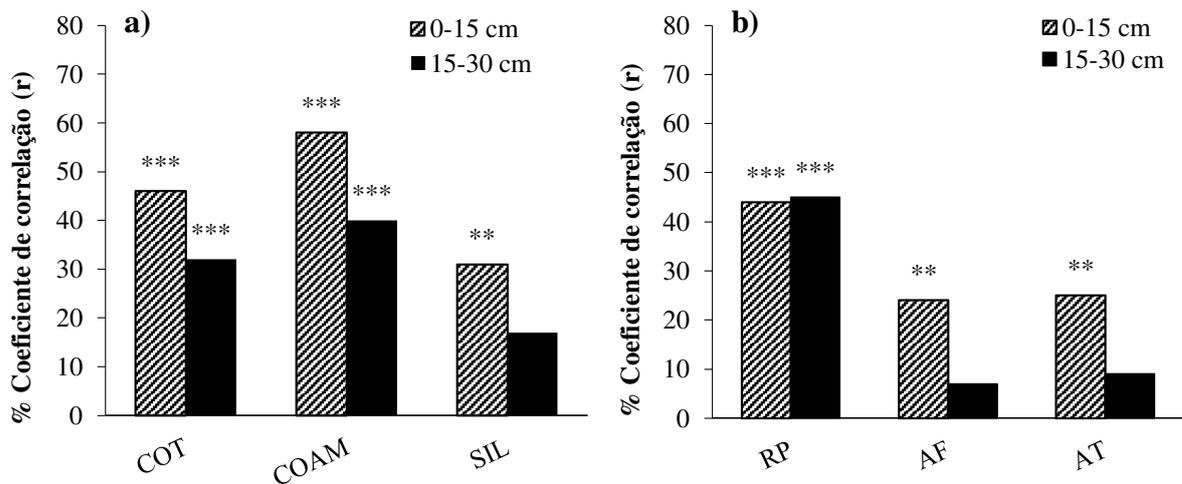
A significância das variáveis COT e COAM, na produtividade, pode ser explicada pelo efeito do aumento das frações da MOS sobre a enraizabilidade do solo e, conseqüentemente, sobre o crescimento das raízes o que proporciona um melhor aproveitamento dos nutrientes e de água presentes no solo. De acordo com Sena et al. (2020), as frações da matéria orgânica, particulada e a associada aos minerais, como seu conteúdo total, contribuem para melhorar a capacidade de enraizamento do solo. Por meio da formação de agregados mais estáveis que, melhoram a porosidade e, portanto, o ambiente do solo para o crescimento das raízes (MOURA et al., 2015), além de favorecer o aumento de retenção de cátions e água (KHDAIR et al., 2019; RAMOS et al., 2018).

Em contrapartida, a RP apresenta efeito negativo com a produtividade de milho, o que pode ser atribuído, ao impedimento físico na zona de crescimento radicular, o que limita o acesso das raízes as camadas superficiais do solo, diminuindo assim o acesso e a eficiência do uso de nutrientes. Conforme Daniells (2012), em solos predispostos à coesão, as raízes das plantas podem explorar apenas uma fina camada superficial para sustentar o desenvolvimento e a produtividade das culturas.

Além disso, o comportamento entre as frações de areia com a produtividade, pode ser explicado por sua baixa área superficial específica, característica de solos mais arenosos, o que dificulta a retenção de água e cátions (MOURA et al., 2009). Segundo Khdaïr et al. 2019, após o aumento de MOS, a área superficial específica das partículas aumenta como também a capacidade de retenção de água e nutrientes.

Dessa forma, é importante levar em consideração a dinâmica da matéria orgânica no solo, uma vez que, as características do solo, como textura, podem ter um grande efeito no conteúdo de carbono orgânico, porque solos mais arenosos têm menos área de superfície para estabilizar a MOS (RASMUSSEN et al., 2018) e, portanto, retêm menos água e nutrientes em comparação com solos ricos em silte e argila (JOHNSTON et al., 2009).

Figura 5. 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.



Nota: COT=carbono orgânico total; COAM= carbono orgânico associado aos minerai; SIL= Silte, AF= Areia fina, AT= Areia Total e RP= resistência à penetração. *, **, ***, correlação significativa ($p < 0,05$); muito significativa ($p < 0,01$) e extremamente significativo ($p < 0,001$), respectivamente.

Os parâmetros da regressão linear múltipla e o método stepwise indicaram que as variáveis do solo analisadas foram capazes de explicar as variações na produtividade do milho em ambas profundidades (0-15 e 15-30 cm) (Tabela 2). A combinação entre COAM e RP foi capaz de explicar 42% e 35% da variação da produtividade do milho na área experimental, nas camadas 0-15 e 15-30 cm, respectivamente.

Nota-se que quase metade da variação da produtividade da cultura pode ser explicada pelas variáveis do solo analisadas. Tal resultado é oportuno, uma vez que o rendimento da colheita depende de outros fatores, como: taxas de germinação, condições climáticas, competição de plantas daninhas e ataque de pragas e doenças.

Ao analisar o padrão de distribuição espacial dos atributos do solo e da produtividade de milho e sua relação de causa e efeito, os autores, Rodrigues; Corá e Fernandes (2012), constataram que o rendimento do milho pode ser explicado pelas propriedades do solo, em que a porcentagem de saturação de bases (V%) foi responsável por 44% da variação da produtividade.

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

Variáveis	Coefficiente de regressão	Erro padrão	t	Pr(> t)
0-15 cm				
Intercepto	5,8300	1,8430	3,1640	0,0020
COAM	0,0890	0,0318	2,7990	0,0060
RP	-0,3996	0,1171	-3,4130	0,0009
GL=112; Erro padrão residual=0,637; R ² =0,4256; F=13,83; p<0,0001				
15-30 cm				
Intercepto	5,6084	1,5456	3,6290	0,0004
COAM	0,1314	0,0353	3,7250	0,0003
RP	-0,3796	0,0864	-4,3950	0,0000
GL=112; Erro padrão residual=0,67; R ² =0,3546; F=10,26; p<0,0001				

Há uma relação linear positiva entre o conteúdo de COAM no solo e a produtividade, em ambas profundidades, de modo que, maiores teores de COAM ($r = 34,2\%$ e $16,2\%$) correspondem no aumento de produtividade do milho (Figura 6a e 6b). Em contrapartida, RP ($r = 21,5$ e $23,1$) apresentou uma relação linear negativa para as duas profundidades, isto é, quanto maior a presença dessa variável menor a produtividade do milho (Figura 6c e 6d).

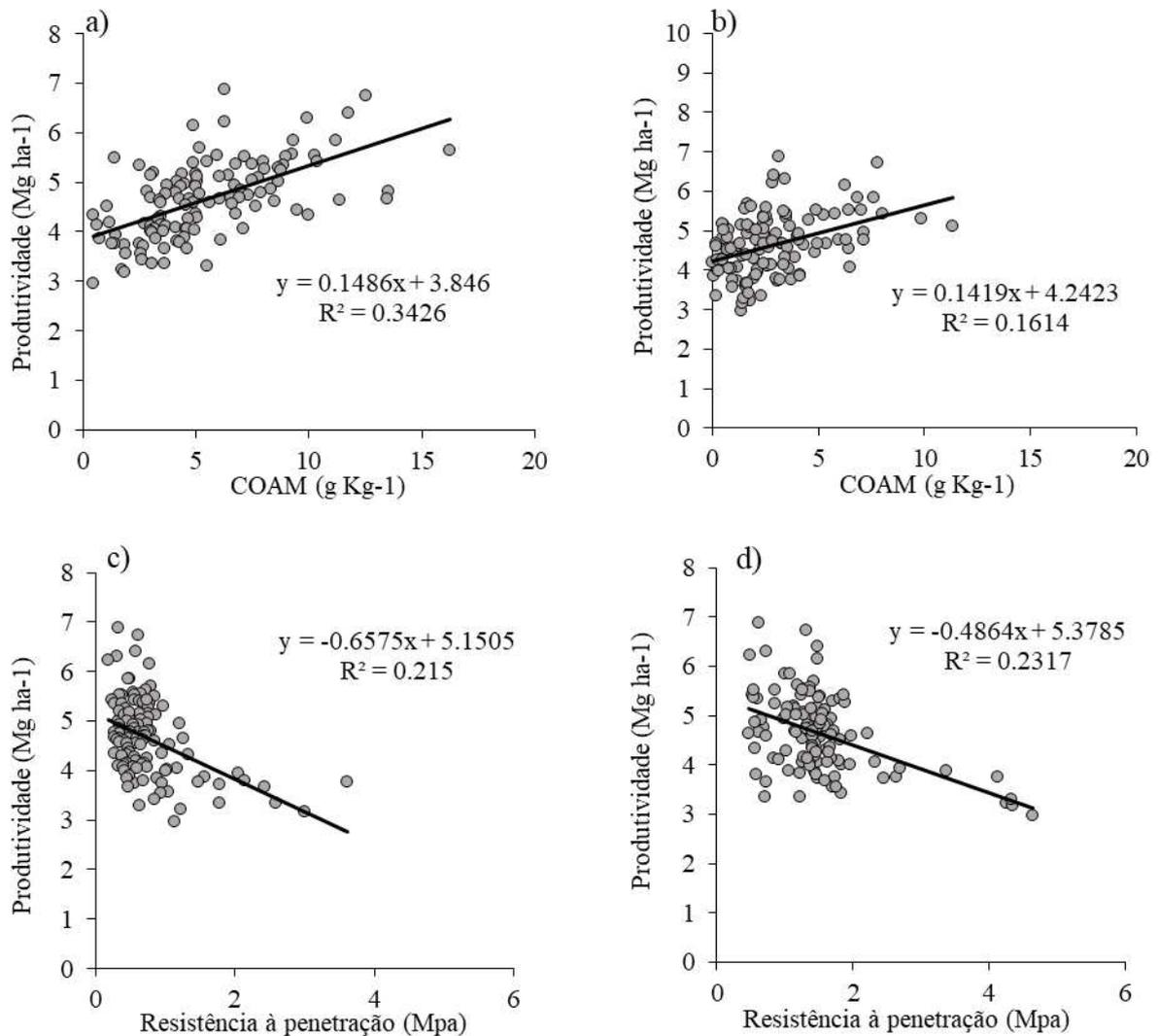
Sendo assim, o acréscimo de 1 g kg^{-1} de COAM, aumenta em $0,148$ e $0,141 \text{ Mg ha}^{-1}$, nas duas profundidades, respectivamente. Isso indica que o aumento no teor de COAM resulta no incremento de produtividade da cultura do milho. De acordo com Oldfield; Bradford e Wood (2019), no estudo que desenvolveram um modelo quantitativo que analisou, a relação da MOS com o potencial de rendimento das culturas de milho e trigo à luz dos fatores de variação de manejo, tipo de solo e clima, descobriram ganhos no rendimento da cultura do milho quando as concentrações de MOS se estabilizaram em 2% . Além disso, os autores ressaltam que 91% dos estudos publicados na análise foram realizados em solos com uma média de $1,1\%$ de carbono orgânico.

Como isso, vale salientar a contribuição do conteúdo de MOS, estabilizada por associação mineral, na melhoria da qualidade física dos solos da região norte maranhense, caracterizados pelos baixos teores de óxidos e carbono orgânico e grandes quantidades de areia fina e silte (DANIELLS et al., 2012; HUANG et al., 2020; SENA et al., 2020). Por isso, é importante destacar que o carbono orgânico é um componente específico capaz de fornecer condições adequadas para o crescimento das raízes e aumentar a eficiência na absorção de nutrientes naturais, ou adquiridos (MOURA et al., 2015). Portanto, o crescimento das raízes, a absorção de nutrientes, o crescimento das plantas e a produtividade das culturas são todos

altamente dependentes dos teores de matéria orgânica do solo (KHDAIR et al., 2019; RAMOS et al., 2018), principalmente, em solos da região tropical.

A importância da qualidade física do solo é observada na análise de dispersão das variáveis analisadas e a produtividade do milho, em que a RP apresentou correlação linear negativa com rendimento da cultura analisada, pois à medida que aumenta a RP em 1 Mpa, ocorre um decréscimo na produtividade de 657 kg ha⁻¹ e 486 kg ha⁻¹ nas profundidades de 0-15 e 15-30 cm (Figura 6c e 6d). O que corresponde à um prejuízo em torno de USD 226,82 – 167,78 ha⁻¹, considerando o preço médio da saca de milho na região no dia 13/08/2021 de USD 20,71 (USD 1,00 = R\$5,25) (CONAB, 2021b).

Figura 6. Dispersão das variáveis explicativas e produtividade do milho: a) e b) Produtividade do milho e COAM, nas camadas 0-15 e 15-30 cm, respectivamente; c) e d) Produtividade do milho e resistência à penetração, nas camadas 0-15 e 15-30 cm, respectivamente.



Pode-se afirmar que há dependência espacial moderada entre as variáveis COAM e RP com a produtividade de milho (>75%) (Tabela 3), expressas por meio dos parâmetros do semivariograma, com base na classificação de Cambardella et al., (1992 apud REICHERT, 2008, p. 986). A avaliação da produtividade do milho (74%), COAM (68% e 62%) e RP (71% e 67%) foram expressas por meio dos semivariogramas, as quais apresentaram dependência espacial nas duas profundidades, sendo ambas ajustadas aos modelos exponencial, esférico e gaussiano, respectivamente (Tabela 3). Os coeficientes de correlação espacial (r^2) ficaram em torno de 84% e 66%, na camada (0-15 cm) e 74% e 84% na camada (15-30 cm) para COAM e RP, respectivamente, 87% para produtividade.

O efeito pepita (Co) e o patamar (Co+C) para produtividade foi de 0,52 e 0,71, respectivamente. Para o COAM os valores do efeito pepita foram de 6,90 e 2,99 e o patamar de 10,16 e 4,86, nas profundidades 0-15 e 15-30 cm. Por outro lado, a variação dos valores do efeito pepita e patamar para a variável RP, foi de 242,14 e 341,05, na profundidade 0-15 cm, respectivamente, e na profundidade 15-30 cm de 393,5 e 590,0. O efeito pepita modela a descontinuidade do semivariograma na origem, que pode ser resultado tanto da escala de amostragem quanto da variabilidade do fenômeno regionalizado em estudo (YAMAMOTO; LANDIM, 2015; RIOS, 2018).

O alcance da produtividade foi de 531 m, enquanto que, houve uma variação de 191 m para COAM e 145 m para RP, nas profundidades (0-15 e 15-30 cm). De acordo com esses resultados, a malha de amostragem utilizada no trabalho (9 x 8 m) foi capaz de expressar as correlações entre as variáveis e a produtividade, pois o seu valor está dentro do raio em que as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. O alcance de dependência espacial é um parâmetro importante na análise do semivariograma e define a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente (SILVA et al., 2017).

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

Nota: COAM= carbono orgânico associado aos minerai; RP=resistência à penetração, Co - Efeito pepita; Co+CI - Patamar; a - alcance; r^2 - coeficiente de variação; GDE - grau de dependência espacial.

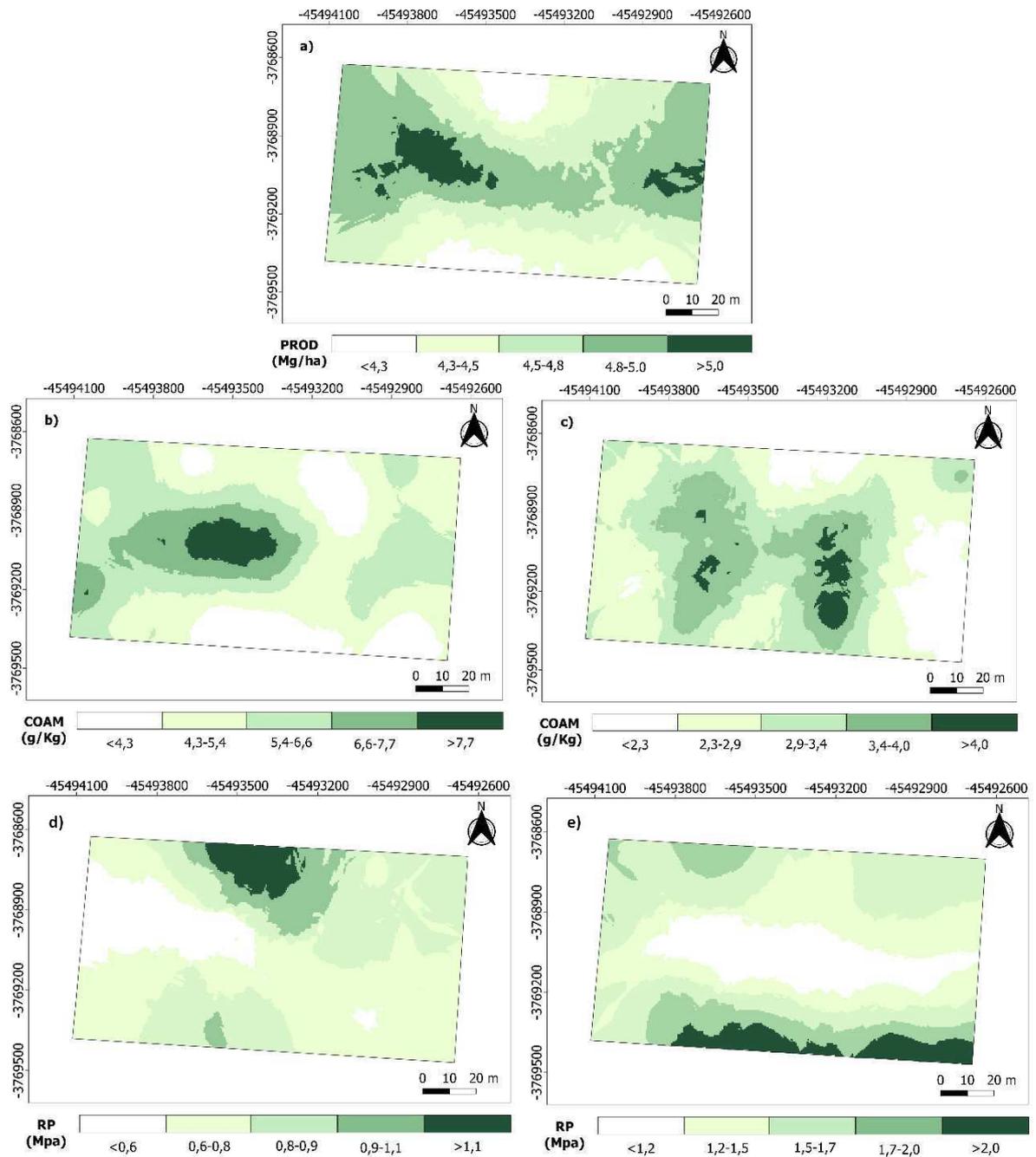
Baseado na semelhança visual dos mapas de isolinhas, em que a variável COAM (Figura 7b e 7c) apresentou padrão semelhante de distribuição espacial com a produtividade (Figura 7a), visualizando-se uma região de maiores valores de produtividade ($> 5 \text{ Mg ha}^{-1}$) ao centro da área na direção oeste e menores em direção as extremidades da área amostral, no sentido norte e sul, em que, apresentam-se os maiores valores de RP (Figura 7d e 7e), ultrapassando a escala de 1,1 – 2,0 Mpa.

A RP acima de 1,53 MPa reduziu linearmente a produtividade de grãos de milho, e acima de 2,18 MPa reduziu a matéria seca de raízes (DEPERON et al., 2016). Enquanto que, Freddi et al. (2007), em estudos em solo de textura média, verificaram que valores de resistência à penetração variando entre 1,03 e 5,69 MPa provocaram alterações na morfologia do sistema radicular do milho, reduzindo a produtividade da cultura em $2,581 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Os resultados demonstram que as interações entre a fração estável do carbono orgânico podem melhorar a zona de crescimento radicular do solo, reduzindo o efeito das condições de resistência à penetração do solo e, conseqüentemente, aumenta a produtividade de grãos de milho. A matéria orgânica do solo exerce um papel crucial na mudança da distribuição do tamanho de poros em solos franco-arenosos, como resultado da diminuição da densidade aparente (ROBIN et al., 2018). Esse aumento da MOS, em solos coesos, diminui a resistência à penetração do solo indiretamente por afetar a estabilidade dos agregados do solo (TARKIEWICZ; NOSALEWICZ, 2005). E o crescimento das raízes está altamente correlacionado com a resistência à penetração do solo, uma vez que as raízes que crescem em solo compactado são morfologicamente diferentes daquelas que crescem em solo friável (PASSIOURA, 1991).

Os mapas de produtividade têm por principal finalidade melhorar o entendimento da variabilidade espacial na lavoura, a fim de que se possa correlacioná-los com demais atributos que influenciam a produtividade da cultura durante o ciclo, sendo uma ferramenta que auxilia a tomada de decisão no manejo sítio-específico (SANTI et al., 2013).

Figura 7. Distribuição espacial da produtividade do milho e suas variáveis predictoras: a) Produtividade do milho; b) e c) COAM nas profundidades 0-15 e 15-30 cm, respectivamente; d) e e) RP nas profundidades 0-15 e 15-30 cm.



6 CONCLUSÃO

A produtividade do milho apresenta variabilidade espacial, condicionada as variáveis do solo, em especial o carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e a resistência à penetração do solo (RP), nas camadas 0-15 e 15-30 cm.

O COAM e a RP apresentaram correlação diferente com o rendimento do milho. A medida que aumentou os níveis de COAM, a produtividade do milho aumentou, no entanto, a produtividade da cultura diminuiu com o aumento da RP no solo.

Nas condições de clima e solo da região de Pindaré-Mirim, deve-se preconizar o manejo do solo que contribua para o aumento e manutenção da fração mais estável do carbono orgânico no solo e que diminua a resistência à penetração do solo para alcançar a produtividade potencial das culturas agrícolas, em especial o milho.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, v. 262, p. 101-111, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- AGUIAR, A. C.; ELIALDO, S. A.; ANAGILA, C. S. J.; MOURA, E. G. How leguminous biomass can increase yield and quality of maize grain in tropical agrosystems. *Legum. Res*, 2019. DOI: 10.18805/LR-380.
- AGUIAR, A. D. C. F.; BICUDO, S. J.; SOBRINHO, J. R. S. C.; MARTINS, A. L. S.; COELHO, K. P.; DE MOURA, E. G. Nutrient recycling and physical indicators of an alley cropping system in a sandy loam soil in the pre-Amazon region of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v.86, n. 2, p. 189-198, 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10705-009-9283-6>.
- ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P. D.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. D. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 3, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000300001>
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta. Embrapa Cerrados-Livro científico (ALICE)**, 2011.
- BALBINOT, A. J.; BACKES, R.; ALVES, A.; OGLIARI, J.; FONSECA, J. Contribuição de componentes de rendimento na produtividade de grãos em variedades de polinização aberta de milho. *Revista Brasileira de Agrociência*, v.11, n.2, p.161-166, 2005. DOI: <https://doi.org/10.18539/cast.v11i2.1184>.
- BAQUERO, J. E.; RALISCH, R.; MEDINA, C. D. C.; TAVARES, F. J.; GUIMARÃES, M. D. F. Propriedades físicas do solo e crescimento radicular de cana-de-açúcar em um latossolo vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 1, p. 63-70, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100007>
- BAYER, C.; MATIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVANATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soil under no-till. *Soil & Tillage Research*, v. 86, n. 2, p. 237-245, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.023>.
- BERISSO, F. E.; SCHJONNING, P.; KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; SIMOJOKI, A.; IVERSEN, B. V.; FORKMAN, J. Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction. *Geoderma*, v. 195, p. 184-191, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.002>
- BERNARDI, A. D. C.; BETTIOL, G. M.; FERREIRA, R. D. P.; SANTOS, K. E. L.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. *Precision agriculture*, v. 17, n. 6, p. 737-752, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9446-9>

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil science society of America journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>

CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; NASCIMENTO, M. F.; SILVA, D. M. P. Estoque de carbono no solo e agregados em Cambissolo sob diferentes manejos no sul do Amazonas. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 2, p. 339-349, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1819>

CARMO, F.F.; FIGUEIREDO, C.C.; RAMOS, M.L.G.; VIVALDI, L.J.; ARAÚJO, L. G. Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio direto com gramíneas. **Bioscience Journal**, v.25, p. 420-431, 2012.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELO, C. R. de; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 34, n. 2, p. 277-290, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001>

CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; ENGEL, V. L.; ZELARAYÁN, M.; OLIVEIRA, E. C.; ARAUJO, A. C. M.; MOURA, E. G. Degradation of riparian forest affects soil properties and ecosystem services provision in eastern Amazon of Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 28, n.2, p.482-493, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/ldr.2547>.

CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; FABBRIS, C.; WEIRICH, S. W.; SILVA, R. F. D.; SILVA, V. R. D.; BASSO, C. J. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 39, n. 2, p. 615-625, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140462>

CHRISTENSEN B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In: Stewart B.A. (eds.) *Advances in Soil Science*. **Advances in Soil Science**, vol. 20. Springer, New York - NY, 1992. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1

CHRISTENSEN, B. T. Structure and organic matter storage in agricultural soils. In: CARTER, M. R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. CRC, v. 8, p. 97-165. 1996.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Preços médios semanais – Produto/Unidade, Milho em grãos (60 kg)**. 2021. Disponível em: http://sisdep.conab.gov.br/precosiagroweb/arquivos/relatorio_VJUbj0.html.pdf. Acesso em 13/08/2021a.

CONAB (COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). **Produção agrícola. Safra 2019/2020 – série histórica dos grãos**. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>. Acesso em: 04 de Agosto de 2021b.

CORRÊA-MARTINS, F. J.; MENDES, J. C.; BERTOLINO, L. C.; MENDONÇA, J. D. O. Petrografia, Diagênese e Considerações sobre Proveniência da Formação Itapecuru no Norte do Maranhão (Cretáceo Inferior, Bacia do Parnaíba, NE Brasil). **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 514-530, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_514_530.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991.

CRUZ, A. C. R.; PAULETTO, E. A.; FLORES, C. A.; SILVA, J. B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1105-1112, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000600015>.

DANIELLS, I. G. Hard setting Soils: a review. **Soil Research**, v. 50, n. 5, p. 349-359, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR11102>

DE MOURA, E. G.; PORTELA, S. B.; MACEDO, V. R. A.; SENA, V. G. L.; SOUSA, C. C. M.; AGUIAR, A. D. C. F. Gypsum and legume residue as a strategy to improve soil conditions in sustainability of agrosystems of the humid tropics. **Sustainability**, v. 10, n.4, p. 1006, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10041006>

DEPERON, M. A.; NAGAHAMA, H. D. J.; OLSZEWSKI, N.; CORTEZ, J. W.; SOUZA, E. B. Influência de implementos de preparo e de níveis de compactação sobre atributos físicos do solo e aspectos agronômicos da cultura do milho. **Engenharia Agrícola**, v. 36, p. 367-376, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p367-376/2016>.

ELLIOTT, E. T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil science society of America journal**, v. 50, n. 3, p. 627-633, 1986. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x>.

ESPINDOLA, Vitor Augusto Silva. **Fracionamento físico do solo em função da irrigação e adubação nitrogenada**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Serra Talhada, 2019. DOI: <http://hdl.handle.net/123456789/2356>

FAGERIA, N. K. Sistema de cultivo consorciado. In: Fageria, N. K. (Ed.) – **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. Embrapa-DPU, Brasília, 1989, p. 185-196.

FREDDI, O. D. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 627-636, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400003>.

GARCIA, U. S. Avaliação dos atributos físicos, químicos e estoque de carbono do solo em diferentes ambientes em matas de babaçu, no estado do maranhão. P. 52. (**Trabalho de conclusão de curso**) - UEMA, São Luís - MA, 2015.inmet

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. **Biology and fertility of soils**, v. 35, n. 4, p. 219-230, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>.

GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; SKJEMSTAD, J. O.; CLARKE, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Soil Research**, v. 32, n. 2, p. 285-309, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9940285>

HIJBEEK, R.; PRONK, A. A.; VAN ITTERSUM, M. K.; TEN BERGE, H. F. M.; BIJTTEBIER, J.; VERHAGEN, A. What drives farmers to increase soil organic matter? Insights from the Netherlands. **Soil Use and Management**, v. 34, n. 1, p. 85-100, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12401>.

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, p. 103295, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Série Histórica 2011-2020 de Dados Mensais da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Convencional de Zé Doca**. 2021. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/mapas_mensal_sem.php. Acesso em: 01 de ago. 2021.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

JABLOUN, M. K.; SCHELDE, F.; TAO, AND J. E. OLESEN. Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark. **European Journal of Agronomy**, v. 62, p. 55-64, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.09.007>.

JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R.; COLEMAN, K. Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in agronomy*, v. 101, p. 1-57, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00801-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00801-8).

KAY, B. D. Soil structure and organic carbon: a review. **Soil processes and the carbon cycle**, p. 169-197, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203739273>.

KHDAIR, A. I.; KHDAIR, S. I.; ABU-RUMMAN, G. A. Dataset on some soil properties improvement by the addition of olive pomace. **Data in brief**, v. 24, p. 103878, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103878>

KING, T.; COLE, M.; FARBER, J. M.; EISENBRAND, G.; ZABARAS, D.; FOX, E. M.; HILL, J. P. Food safety for food security: Relationship between global megatrends and developments in food safety. **Trends in Food Science Technology**, v. 68, p. 160-175, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.014>.

KOPITTKE, P. M.; MENZIES, N. W.; WANG, P.; MCKENNA, B. A.; LOMBI, E. Soil and the intensification of agriculture for global food security. **Environment international**, v. 132, p. 105078, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.

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

KUMAR, S.; SINGH, R. P. Spatial distribution of soil nutrients in a watershed of Himalayan landscape using terrain attributes and geostatistical methods. **Environmental Earth Sciences**, v.75, n.6, p.473, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5098-8>

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

LIMA, I. M. A.; ARAÚJO, M. C.; BARBOSA, R. S. Avaliação das propriedades físicas do solo em sistemas silvipastoris, região centro-norte, estado do Piauí. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande-PB, v. 9, n. 1, p. 117-124, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v9i1.252>.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; CUNHA DOS ANJOS, L. H.; SILVA, E. M. R. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em diferentes sistemas de produção orgânica. **Idesia (arica)**, v. 29, n. 2, p. 11-19, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000200002>.

MCBRATNEY, A. B.; MORGAN, C. L. S.; JARRETT, L. E. The value of soil's contributions to ecosystem services. In: **Global Soil Security**. Springer, Cham, 2017. p. 227-235. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-43394-3_20.

MIAO, Y.; MULLA, D. J.; ROBERT, P. C. Identifying important factors influencing corn yield and grain quality variability using artificial neural networks. *Precision Agriculture*, v. 7, n. 2, p. 117-135, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-006-9004-y>.

MONTANARI, R.; PANACHUKI, E.; LOVERA, L. H.; CORREA, A. R.; OLIVEIRA, I. S.; QUEIROZ, H. A.; TOMAZ, P. K. Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono Cerrado-Pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 385-396, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140215>.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ª ed. Lavras: Editora UFLA, 729 p. 2006.

MOTTIN, Marcos Cesar. **Caracterização química da matéria orgânica, propriedades físicas do solo e produtividade de milho de segunda safra consorciado com plantas de cobertura e soja em sucessão**. 2019. 69 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2019. URI: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/4597>

MOURA, E. G.; AGUIAR, A. C. F.; PIEDADE, A. R.; ROUSSEAU, G. X. Contribution of legume tree residues and macrofauna to the improvement of abiotic soil properties in the eastern Amazon. **Applied Soil Ecology**, v. 86, p. 91-99, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.10.008>.

MOURA, E. D.; MOURA, N. G.; MARQUES, E. S.; PINHEIRO, K. M.; COSTA SOBRINHO, J. R. S.; AGUIAR, A. C. F. Evaluating chemical and physical quality indicators for a structurally fragile tropical soil. **Soil Use and Management**, v. 25, n. 4, p. 368-375, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00238.x>

MOUSSADEK, R.; MRABET, R.; DAHAN, R.; ZOUAHRI, A.; EL MOURID, M.; RANST, V. E. Tillage system affects soil organic carbon storage and quality in Central Morocco. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2014, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/2014/654796>.

NOEL, S.; ETTER, F.M. H.; STEWART, N. Economics of Land Degradation Initiative: Report for policy and decision makers_ Reaping economic and environmental benefits from sustainable land management. **Bonn, Germany: ELD Initiative and Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH**, 2015. URI: <https://hdl.handle.net/20.500.11766/4881>.

OLDFIELD, E. E.; BRADFORD, M. A.; WOOD, S. A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. **Soil**, v. 5, n. 1, p. 15-32, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019>.

PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. **Australian Journal Soil Research** 29:717–28. 1991. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9910717>

PAZ-GONZALEZ, A.; VIEIRA, S. R.; CASTRO, M. T. T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. **Geoderma**, v. 97, n. 3-4, p. 273-292, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00066-5).

PINTO, L. A. D. S. R.; PEREIRA, M. G.; DOS SANTOS, O. A. Q.; DE SOUZA, R. S.; DE SOUSA MORAIS, I.; FERREIRA, R.; JUNIOR, W. F. S.; MARTELLETO, L. A. P. Carbono orgânico e agregação do solo em áreas sob diferentes densidades de plantio da cultura da bananeira. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 10268-10285, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n3-053>

PRETTY, J. Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. **Science**, v. 362, n. 6417, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aav0294>

PRIMO, D. C.; MENEZES, R. C.; SILVA, T. O. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, v. 7, n. 5, 2011.

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. 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**, v. 98, n. 9, p. 3595-3602, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8881>

RASMUSSEN, C.; HECKMAN, K.; WIEDER, W. R.; KEILUWEIT, M.; LAWRENCE, C. R.; BERHE, A. A.; WAGAI, R. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 3, p. 297-306, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>.

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

REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; JOSÉ REINERT, D.; SILVA, V. R. D. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, v. 38, p. 981-988, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000400012>.

RIOS, Érica dos Santos. **O efeito de borda na Geoestatística**. 2018. 43 f. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018. URI: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/18405>.

RITTL, T. F.; OLIVEIRA, D.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stock changes under diferente land uses in the Amazon. **Geoderma Regional**, v. 10, p. 138-143, sep. 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.07.004>.

ROBIN, P.; MOREL, C.; VIAL, F.; LANDRAIN, B.; TOUDIC, A.; LI, Y., AKKAL-CORFINI, N. Effect of three types of exogenous organic carbon on soil organic matter and physical properties of a sandy technosol. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 1146, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10041146>.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Spatial relationships between soil attributes and corn yield in no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 599-609, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200029>.

RODRIGUES, M.; RABÊLO, F. H. S.; CASTRO, H. A. D.; ROBOREDO, D.; CARVALHO, M. A. C. D.; ROQUE, C. G. Alterações nos atributos químicos do solo pelo uso e manejo em latossolo na Amazônia. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 2, p. 278-286, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n202rc>.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online], v. 17, n. 5, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S141543662013000500002>.

SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; MIRANDA, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. **Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2018. DOI: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1092863>

SANTI, A. L.; AMADO, T. J.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; DA SILVA, R. F.; DA ROS, C. O. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013. DOI: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119028125024>.

SANTOS, D. C.; LIMA, C. L. R.; KUNDE, R. J.; CARVALHO, J. S.; ABEIJON, L. M.; PILLON, C. N. Agregação e proteção física da matéria orgânica em Planossolo háplico sob diferentes sistemas de manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p. 28:54-63, 2012.

SANTOS, M. L.; DE PASSOS, M.; RAPASSI, R. M. A.; MURAIISHI, C. T.; MALLER, A.; MATOS, F. A. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 313-321, 2006. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v28i3.939>.

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

SCHOENHOLTZ S. H.; MIEGROET, H. V.; BURGER J. A. Review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v.138, p.335-356, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)

SECCO, D.; DA ROS, C. O.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 407-414, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000300011>.

SENA, V. G.; DE MOURA, E. G.; MACEDO, V. R.; AGUIAR, A. C.; PRICE, A. H.; MOONEY, S. J.; CALONEGO, J. C. Ecosystem Services for Intensification of Agriculture, With Emphasis on Increased Nitrogen Ecological use Efficiency. **Ecosphere**, v. 11, n. 2, p. e03028, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3028>

SIGNOR, D.; DEON, M. D.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. E. P. Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under differentl and uses in Eastern Amazon. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 3, p. 225-232, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0089>.

SILVA, F. J.; DE OLIVEIRA, C. A. A.; DA SILVA ALMEIDA, L.; DE LIMA, L. P.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da produtividade do milho. **Revista de agricultura neotropical**, v. 4, n. 3, p. 77-84, 2017. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v4i3.1625>.

SILVEIRA, D. D. C.; MELO FILHO, J. F. D.; SACRAMENTO, J. A. A. S. D.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300007>

SITHOLE, N. J.; MAGWAZA, L. S.; THIBAUD, G. R. Long-term impact of no-till conservation agriculture and N-fertilizer on soil aggregate stability, infiltration and distribution of C in different size fractions. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 147-156, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.004>.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 533-542, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300014>.

TARKIEWICZ, S.; NOSALEWICZ, A. Effect of organic carbon content on the compactibility and penetration resistance of two soils formed from loess. **International agrophysics**, v. 19, n. 4, p. 345-350, 2005.

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

THALMANN, M.; SANTELIA, D. Strach como um determinante da aptidão da planta sob estresse abiótico. **O Novo Fitologista**, 214 (3), p. 943–951, 2017.

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260-20264, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>

TRENTIN, R. G.; MODOLO, A. J.; VARGAS, T. O.; CAMPOS, J. R. R.; ADAMI, P. F.; BAESSO, M. M. Soybean productivity in Rhodic Hapludox compacted by the action of furrow openers. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 40, p. 1-9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.35015>.

TROIAN, D., SÉRGIO ROSSET, J., BATISTA NANDI MARTINS, L. F., BARROS OZÓRIO, J. M., DE PIERRI CASTILHO, S. C., MARCIANO MARRA, L. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 13, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n4p1447-1469>

USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 241-250, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.015>.

VIAN, A. L.; SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J. M.; BREDEMEIER, C. Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Ciência Rural**, v. 46, p. 464-471, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150539>.

VIERO, F.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; MORAES, R. P. D. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1515-1525, 2014.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, p. 319-344. 1980.

WELTER, Alexandre. **Rendimento de grãos de milho em função de atributos físicos do solo**. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2019. URI: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/15846>.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos. Online Book, p. 215, 2015.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soils science and planta nalysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>