

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA
CURSO DE AGRONOMIA**

LARISSA DOS SANTOS CHAGAS OLIVEIRA

**RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM
AGROECOSSISTEMAS DO LESTE MARANHENSE**

Chapadilha – MA

2023

LARISSA DOS SANTOS CHAGAS OLIVEIRA

RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM
AGROECOSSISTEMAS DO LESTE MARANHENSE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Comissão do Curso de
Agronomia da Universidade Federal do
Maranhão, Centro de Ciências de
Chapadinha, como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Nítalo André Farias
Machado

Coorientador: Dr. José Oscar Lustosa de
Oliveira Júnior

Chapadinha – MA

2023

LARISSA DOS SANTOS CHAGAS OLIVEIRA

RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO DO SOLO EM
AGROECOSSISTEMAS DO LESTE MARANHENSE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão do Curso de Agronomia da Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinha, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Aprovado em: 18 de dezembro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nítalo André Farias Machado (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Prof. Dr. José Oscar Lustosa de Oliveira Júnior (Coorientador)
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária– EMBRAPA

Profa. Dr. Gustavo André de Araújo Santos (Examinador)
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Profa. M^a Anailda Tertulino Farias (Examinador)
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Chagas Oliveira, Larissa dos Santos.

RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO DO SOLO EM
AGROECOSSISTEMAS DO LESTE MARANHENSE / Larissa dos Santos
Chagas Oliveira. - 2023.

40 f.

Coorientador(a): José Oscar Lustosa de Oliveira Junior.

Orientador(a): Nitalo André Farias Machado.

Curso de Agronomia, Universidade Federal do Maranhão,
Universidade Federal do Maranhão - UFMA, 2023.

1. Compactação. 2. Geoestatística. 3. Integração
Lavoura Floresta. I. Farias Machado, Nitalo André. II.
Lustosa de Oliveira Junior, José Oscar. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico primeiramente a Deus, por me dá a oportunidade trilhar meu sonho e a minha família, meu bem mais precioso que o Senhor me deu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por me dá a oportunidade de seguir meu sonho e me tornar uma Agrônoma.

A minha família, que sempre me apoio em todas as minhas decisões e sonhos, em principal minha Mãe Eduarda dos Santos Chagas Oliveira, por sempre está comigo e me dando conselhos valiosos que sempre carregarei na minha vida, sempre orando por mim, acreditando e confiando. Ao meu Pai José dos Santos de Sousa Oliveira, por sempre me dá palavras de conforto, quando estava perto de fraquejar. As minhas irmãs, Maria Luzia dos Santos Chagas Oliveira e Fabiana Aparecida de Sousa Vieira, vocês duas são meu maior porto de conforto e alegria e mesmo distante, sempre esteve comigo em todos os momentos.

Aos amigos Marcos Paulo, Debora, Lorena, Revena, Sheyla, Ruth, que ao longo da minha passagem por Chapadinha – MA, se fizeram presente e tornaram a estadia por aqui, muito mais aconchegante e cheia de momentos incríveis.

Aos amigos da faculdade que são muitos, foram longos 5 anos, nos quais dividimos diversas experiências, disciplinas, e no qual sempre nós ajudamos e aqui meu muito obrigada a vocês.

A um amigo em especial Diemerson Cunha, por me acompanhar e auxiliar, estando comigo em todos os momentos de alegria e de dificuldade e por ter me dado meu maior presente, meu gatinho Romeu, sou muito grata a você por tudo.

Agradeço aos professores, pelos ensinamentos passado, por toda dúvida tirada, pelos conselhos, pois não é fácil a jornada que enfrentamos, por todo zelo e cuidado em sempre passar no final, uma mensagem que se nos esforçamos, nossos sonhos são concretizados.

Ao grupo de pesquisa, Procema, que deu a oportunidade de conhecer pessoas incríveis e de poder aplicar meus conhecimentos teóricos na prática, obrigada professora Mariléia pela oportunidade, que me foi dada.

Ao grupo Slc Agrícola, que me fez enxergar meu potencial, e acreditar que sim, eu consigo, agradeço a todos os colaboradores que me auxiliaram nessa minha caminhada de crescimento pessoal e profissional.

A Embrapa Meio-Norte pelo suporte para realização deste trabalho, em especial ao Dr. Oscar pelo tempo destinado ao estudo, parceria e empenho.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Nítalo Machado, por confiar e acreditar no meu potencial, sou muito grata por seu apoio e ensinamentos.

EPÍGRAFE

Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.

Josué 1:9

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	HIPÓTESE.....	14
3	OBJETIVOS	15
3.1	Geral	15
3.2	Específicos	15
4	REVISÃO DE LITERATURA	16
4.1	Degradação Física do Solo.....	16
4.2	Agricultura de Precisão	17
4.3	Indicadores de Qualidade Física do solo	18
4.4	Geoestatística na Agricultura.....	20
4.5	Sistemas de Integrações.....	21
5	MATERIAL E MÉTODOS	23
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
7	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS	34

RESUMO

A utilização de sistemas integrados pode colaborar com a melhoria das propriedades físicas do solo e da ciclagem de nutrientes. Este estudo teve como objetivo avaliar e realizar a geoespacialização da resistência mecânica do solo à penetração (RP) em agroecossistemas no leste maranhense. O estudo foi realizado na Fazenda Barbosa, localizada no município de Brejo – MA, em área de sistema de produção convencional de semeadura direta (SC) e Integração Lavoura Floresta (ILF). Em novembro de 2023, foi realizada a coleta de dados com auxílio de um penetrômetro digital da Falker modelo PenetroLOG 2040 (capacidade de até 100 Mpa), em áreas de 2 ha nos sistemas SC e ILF, a partir de uma grade amostral de 20 x 15 m, com 75 pontos georreferenciados. As análises obtidas pelos testes t de *student* e F de Fisher, demonstrou que a RP foi ($P < 0,05$) maior no SC em comparação com o ILF. A geoespacialização do RP revelou que os valores mais elevados se concentram no oeste do sistema de ILF e os menores valores, variando entre 1,04 e 5,36 Mpa, nas regiões central e noroeste. Na região sudoeste e na porção central da área do SC foi observado a ocorrência das maiores concentrações de RP. Já no sentido norte sul na área de SC analisada, foi observado muitos pontos com $RP > 100$ Mpa. Em conclusão, pode-se apontar que o emprego de sistema integrados pode contribuir para reduzir a RP nas condições específicas de cultivo do Leste Maranhense.

Palavras-chave: Compactação, Geostatística, Integração Lavoura Floresta

ABSTRACT

The use of integrated systems can help improve soil physical properties and nutrient cycling. This study aimed to evaluate and carry out the geospatialization of soil mechanical resistance to penetration (RP) in agroecosystems in eastern Maranhão. The study was carried out at Fazenda Barbosa, located in the municipality of Brejo – MA, in an area with a conventional production system of direct seeding (SC) and Integrated Crop Forest (ILF). In November 2023, data was collected with the aid of a Falker digital penetrometer model PenetroLOG 2040 (capacity of up to 100 Mpa), in areas of 2 ha in the SC and ILF systems, from a 20 x sampling grid 15 m, with 75 georeferenced points. The analyzes obtained by Student's t and Fisher's F tests demonstrated that the PR was ($P < 0.05$) higher in SC compared to ILF. The geospatialization of the RP revealed that the highest values are concentrated in the west of the ILF system and the lowest values, varying between 1.04 and 5.36 Mpa, in the central and northwestern regions. In the southwest region and in the central portion of the SC area, the highest concentrations of RP were observed. In the north-south direction in the SC area analyzed, many points with $RP > 100$ Mpa were observed. In conclusion, it can be pointed out that the use of integrated systems can contribute to reducing PR in the specific cultivation conditions of Eastern Maranhão.

Keywords: Compaction, Geostatistics, Crop Forest Integration

1. INTRODUÇÃO

O solo é um dos recursos naturais mais abundantes da biosfera terrestre, com propriedades químicas, físicas e biológicas intrinsecamente interconectadas em uma relação funcional harmônica. Um dos maiores desafios enfrentados pela agropecuária brasileira é a degradação dos solos provocada por práticas inadequadas de manejo (BARROS et al., 2018). A exploração sem controle dos recursos naturais e o crescimento populacional, não causa só problemas na produção de alimentos, mas também reduzem a capacidade do solo em manter seus serviços ecossistêmicos essenciais (NASCIMENTO et al., 2019).

As interferências antrópicas no uso do solo têm modificado as propriedades físicas do solo, resultando em danos como a compactação, aumento da densidade de partículas, redução da porosidade, entre outros (NETO et al., 2015). Essas alterações afetam negativamente a distribuição dos diâmetros dos poros, a agregação das partículas e até mesmo as trocas gasosas no solo, afetando principalmente o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, reduzindo seu crescimento e produção das plantas, o que pode proporcionar efeitos deletérios na lucratividade das fazendas.

Os indicadores físicos do solo são frequentemente utilizados como parâmetros de qualidade e saúde do solo, com vital relevância no estabelecimento de zonas de manejo, principalmente devido à facilidade de determinação e ao custo acessível das medições (RESENDE et al., 2014; NETO et al., 2021). O estudo das propriedades físicas do solo é realizado com técnicas da geoestatística, uma ferramenta que estuda a variabilidade espacial, permitindo uma interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (SOUZA et al., 2011).

Essa abordagem permite análises confiáveis de sistemas de manejo e de uso do solo. A avaliação qualitativa por meio da distribuição espacial das estruturas do perfil do solo, e quantitativa por meio do grau de resistência à penetração, ou compactação são fundamentais para verificar a qualidade do solo e estabelecer limites de compactação que não prejudiquem o desenvolvimento das raízes das

plantas nos diversos agroecossistemas Tavares-Filho et al. (1999). Estudos nessa temática são importantes para o desenvolvimento sustentável da produção em regiões de fronteira agrícola, apontando a necessidade e justificativa da presente investigação.

A expansão da fronteira agrícola na região nordeste do Brasil tem incorporado ao sistema produtivo nacional solos de fertilidade marginal e alto grau de intemperização (Resende et al., (2014). Além disso, tal expansão tem impulsionado o uso de áreas do Maranhão e Piauí com solos coesos, com atributos físicos que restringem o crescimento das raízes das plantas cultivadas e promovem o processo erosivo. Para superar esse e outros desafios edafodimáticos da agricultura equatorial, o uso de sistemas integrados de produção tem sido amplamente recomendado. O objetivo do trabalho é analisar a relação entre as práticas de manejo adotadas em cada agroecossistema e a resistência mecânica a penetração do solo, para identificar estratégias de manejo que possam reduzir a compactação do solo, sendo assim, a realização de mapas temáticos para a caracterização dos Agroecossistemas.

2. HIPÓTESE

Os sistemas integrados de produção têm como resultado direto o incremento significativo da matéria orgânica no solo e a incorporação do sistema radicular mais profundo ao sistema produtivo, que permite aprimorar as propriedades físicas do solo e a ciclagem de nutrientes.

3. OBJETIVO

3.1. Objetivo Geral

O objetivo deste estudo foi analisar e a resistência mecânica do solo a penetração em dois agroecossistemas no Leste Maranhense.

3.2. Objetivos Específicos

Analisar a relação entre as práticas de manejo adotadas em cada agroecossistema e a resistência mecânica a penetração do solo, para identificar estratégias de manejo que possam reduzir a compactação do solo;

Gerar mapas temáticos da variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em cada agroecossistema, fornecendo informações visuais sobre as diferenças e semelhanças entre as áreas estudadas.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Degradação Física do Solo

O solo normalmente apresenta variações nos seus atributos físicos, químicos e biológicos, mesmo em áreas homogêneas e pertencentes à mesma classificação. Este fato ocorre porque o material de origem dos solos não é uniforme devido às diferenças com relação à dureza, composição química, cristalização, entre outras fontes, associado a condições de relevo, clima e organismos que atuam na gênese dos mesmos (SOUZA et al., 2010).

Sendo assim, a produtividade das culturas pode ser variável em uma mesma área por menor que seja o grau de variação espacial de determinados atributos a serem verificados. Além disso, as novas e modernas técnicas de cultivo com a mecanização e uso intensivo do solo também contribuem para modificarem seus atributos físicos e químicos, conseqüentemente, influenciando na produção, no equilíbrio dos recursos naturais e na dinâmica da água no solo (GOMES et al., 2007). Segundo Campos et al. (2009) e Sanchez et al. (2009), a agricultura convencional não leva em conta a aptidão agrícola das terras e, neste caso, as variações ocasionadas pelo uso intensivo do solo, acima da sua capacidade de suporte, leva a necessidade de preparos mais intensivos e adição de insumos em quantidade cada vez maior.

Ao procurar conhecer a variabilidade existente nos nossos solos, alguns agricultores estão adotando uma nova tecnologia no qual determina com precisão as variabilidades desse solo, denominado, no Brasil, de agricultura de precisão. E esse sistema adota diversos procedimentos e novas tecnologias no que permitem aplicar no local correto e momento adequado, a quantidade real necessária dos insumos para a produção agrícola (MOLIN; CASTRO, 2008; SOUZA et al., 2010). Isso é possível porque na agricultura de precisão são aplicados os princípios da geoestatística no que auxilia na caracterização da variabilidade espacial dos atributos físicos que fazem parte dos fatores de produção agrícola (AMADO et al., 2009; SANCHEZ et al., 2009).

Um das ações complementares e aliadas no processo de agricultura de precisão, é a identificação diretamente no campo, da resistência dos solos à

penetração, que é bastante variável, sendo muito influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e à intensidade de tráfego das máquinas agrícolas, e principalmente dependente da umidade do solo. Anualmente, o acúmulo de pressões provocadas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal sobre solo provoca locais de maior estado de compactação, principalmente, nas áreas ditas de “cabeceira” nas quais o tráfego de máquinas é mais intenso.

A geoestatística, ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem. Estudos relatam o efeito da variabilidade espacial de outras propriedades físicas (umidade gravimétrica do solo e teor de argila) e químicas (fósforo disponível e potássio) do solo nas culturas de interesse econômico.

4.2. Agricultura de Precisão

Agricultura de precisão é um conjunto de tecnologias que vêm sendo desenvolvidas e podem ser adotadas nos sistemas de produção em pequena e larga escala. A ideia de agricultura de precisão surgiu antes mesmo do período da Revolução Industrial como uma forma para melhorar os rendimentos de culturas de interesse econômico, levando em conta os aspectos de localização, fertilidade do solo, entre outros fatores.

Os parâmetros para a agricultura de precisão moderna, como conhecemos hoje, vem do início do século XX, porém somente na década de 1980, na Europa e nos EUA, com o desenvolvimento de microcomputadores, sensores e softwares é que a agricultura de precisão se tornou-se viável para os produtores do mundo todo. E nesse contexto, a agricultura de precisão se caracteriza como conjunto de técnicas que permite o gerenciamento localizado nos sistemas de interesse agrícola e pecuários.

O uso de equipamento adequados contribuiu para uma redução de perdas na agricultura antiga. Por meio de tais instrumentos como um gps, ou até mesmos os softwares, com a agricultura de precisão é possível obter dados provenientes da análise da propriedade subdividida em pequenas áreas (informações geográficas

georreferenciadas), relativas a especificamente, propriedades físicas do solo, necessidade de aplicação de defensivos. Quanto mais subdividida a propriedade rural, mais útil será a informação georreferenciada.

O controle das variáveis que influenciam o cultivo depende do maior detalhamento das informações, o uso de Sistema de Posicionamento Global (GPS), Sistema de Informações Geográficas (GIS) e máquinas de aplicação localizadas de insumos a taxas variáveis, são algumas das ferramentas que tratam, especificamente cada ponto da propriedade agrícola, além do uso de outros equipamentos modernos. Agricultura de precisão ou manejo por zonas uniformes tem por princípio básico o manejo da variabilidade dos solos e culturas no espaço e no tempo. Sem essa variabilidade, o conceito de agricultura de precisão tem pouco significado e nunca teria evoluído (Mulla & Schepers, 1997).

A agricultura de precisão engloba aspectos da variabilidade dos solos, clima, diversidade de culturas, performance de máquinas agrícolas e insumos (físicos, químicos e/ou biológicos) naturais ou sintéticos, usados na produção das culturas agrícolas. Com base nesses princípios, Pierce & Nowak (1999) definiram agricultura de precisão como a aplicação de princípios e tecnologias para manejar a variabilidade espacial e temporal, associada com todos os aspectos da produção agrícola, com o objetivo de aumentar a produtividade na agricultura e a qualidade ambiental.

4.3. Indicadores de Qualidade Física do Solo

O conceito de qualidade física do solo, engloba os conhecimentos de propriedades e processos relativos à habilidade do solo em se manter de forma eficiente, os seus serviços ambientais e ecossistêmicos, tais como, manter preservado a microbiota do solo, sustentação de moradia, preservação de nascentes. Segundo Aguiar (2008), a estrutura do solo pode ser avaliada pelos seguintes aspectos: densidade do solo, presença de macro e microporosidade, estabilidade dos agregados, resistência à penetração, taxa de infiltração de água no solo, entre outras formas.

Ao considerarmos que o solo seja um recurso limitado e que alguns de seus componentes requerem certos períodos para serem restaurados, as atividades que

são realizadas de forma equivocada através do manejo inadequado se tornam essenciais, para que cuidados sejam tomados. A utilização de técnicas, como capacidade do solo em drenar água, textura, grau de compactação, para avaliar a qualidade do solo de uma forma mais ampla, simples e confiável, ainda são objetos de estudos, e os resultados sistemáticos destes monitoramentos representam um papel importante nos estudos relacionados à qualidade física do solo.

A baixa capacidade de infiltração de água, alto escoamento superficial, baixa aeração, e dificuldade de mecanização por conta da compactação são formas de identificação da baixa qualidade física dos solos, que podem interferir na má formação do sistema radicular das plantas. A qualidade física é considerada boa quando os solos exibem condição oposta ou ausência dos problemas já mencionados. Frequentemente, um solo apresenta todos esses problemas físicos simultaneamente, sendo importante frisar, que todos esses sintomas têm uma causa em comum - a estrutura do solo degradada (Dexter, 2004). A degradação da estrutura do solo pode comprometer o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, a produção agrícola.

Segundo Singer & Ewing (2000), os atributos mais utilizados como indicadores de qualidade física do solo deveriam ser aqueles que consideram a profundidade efetiva de enraizamento, porosidade total, distribuição e tamanho dos poros, distribuição do tamanho das partículas, densidade do solo, resistência do solo à penetração das raízes, intervalo hídrico ótimo, índice de compressão e estabilidade dos agregados.

Contudo, há outros indicadores de qualidade física do solo, como a curva de retenção de água do solo, a condutividade hidráulica, a porosidade, o ponto de inflexão e as características de retenção de água do solo; que tornam o processo de avaliação da qualidade física mais simples, rápido e menos complexo (Santos et al., 2011a).

Na medida em que se intensifica o uso agrícola os atributos físico-hídricos do solo sofrem alterações, geralmente adversas ao crescimento vegetal, que ficam mais nítidas quando os sistemas de uso são comparados com o estado do solo ainda sob vegetação natural (Santos, 2010, Santos et al., 2011a). Nesse sentido, ainda existe um campo a ser explorado no que conceme ao desenvolvimento de novos indicadores para a avaliação da qualidade física do solo, principalmente no caso dos

solos que compõem os diferentes biomas brasileiros, ainda pouco explorados, notadamente no tocante aos estudos associados ao uso de atributos físico-hídricos como forma de aferição de sua sustentabilidade produtiva (Santos, 2010).

4.4 Geoestatística Aplicada à Agricultura

A agricultura vem sempre almejando o equilíbrio entre os insumos a serem aplicados e as práticas agrícolas implantadas na lavoura. Por isso, o uso de um manejo adequado na realização dessas análises e representação de dados são de extrema importância. A variabilidade espacial de solos sempre foi utilizada quando o assunto é a amostragem dos atributos físicos, químicos e biológicos. E recentemente, surgiu uma ferramenta compreensível para verificação desses dados chamada Geoestatística, própria para analisar a variabilidade espacial.

Sabe-se que é de suma importância que o modelo estatístico adotado seja validado usando todos os dados da amostragem feita no campo, a fim de mostrar todos os resultados adquiridos pelo delineamento utilizado. Diretamente relacionada com a geoestatística, a agricultura de precisão vem utilizando as novas tecnologias que são desenvolvidas para o monitoramento intensivo do campo, como, plantio, colheita, aplicação de defensivos. E isto envolve a adoção de diferentes sensores voltados para captação de dados que permitem quantificar os principais fatores de produção com alta precisão espacial (WHELAN, 1998).

Apesar dos procedimentos da análise geoestatística não diferem conceitualmente nos ensaios para aplicações de diversos fins, como na estudos na área de pecuária, em área de florestas, porém na Agricultura de Precisão a disponibilidade de dados em alta resolução espacial e temporal viabiliza não só uma maior robustez nos resultados, como também o entendimento integrado e dinâmico das correlações espaciais e temporais entre os diferentes fatores.

A ferramenta de análise geoestatística se constitui da maneira mais correta que se tem conhecimento para analisar a variabilidade espacial (VIEIRA, 2000). Há necessidade absoluta de conhecimento adequado da variabilidade espacial das

características do ambiente agrícola, sem o qual existe o risco de aplicações inapropriadas dos resultados.

Entre as aplicações da geoestatística voltadas para prover informações em suporte da agricultura estão a caracterização e a modelagem espacial e temporal, das quais resultam a produção de mapas precisos para bases de informação da área de produção (McBRATNEY et al., 2005).

Desta maneira, através da geoestatística avalia-se a dependência espacial e a utiliza para interpolar valores para locais não medidos, e com isto se produz informações para construir mapas contínuos a partir da amostragem discretizada e para estruturar amostragens em função da variabilidade espacial.

Em agricultura de precisão, a possibilidade de gerar mapas relacionados à produtividade agrícola utilizando a geoestatística, constitui um avanço no manejo localizado, segundo Tisseyre & McBratney (2007), dos sistemas de produção agrícolas e uma maior precisão na tomada de decisão.

4.5 Sistemas de Integrações

A demanda crescente por alimentos, uso de bioenergia e produtos florestais, em contraposição à necessidade de redução de desmatamento e mitigação da emissão de gases de efeito estufa, requer soluções que permitam incentivar o desenvolvimento socioeconômico, sem comprometer a sustentabilidade dos recursos naturais. Segundo Vilela et.al (2011), a intensificação do uso da terra em áreas agrícolas e o aumento da eficiência dos sistemas de produção podem contribuir para harmonizar esses interesses. E é nesse cenário em que as estratégias de integração lavoura-pecuária-floresta, contemplam os sistemas integração lavoura-pecuária, silviagrícolas, silvipastoris e agrossilvipastoris (Balbino et al., 2011), tem sido apontada como alternativa para conciliar esses conflitos de interesse da sociedade. De acordo com Wilkins (2008), os sistemas mistos de produção agrícola são mais sustentáveis do que os sistemas especializados em produção de grãos e fibras, conhecidos como convencionais.

O interesse, nesse modelo de exploração, apoia-se nos benefícios que podem ser auferidos pelo sinergismo entre pastagens e culturas anuais, como: melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo; quebra de ciclo de doenças e

redução de insetos-pragas e de plantas daninhas; redução de riscos econômicos pela diversificação de atividades; e redução de custo na recuperação e na renovação de pastagens em processo de degradação.

Os sistemas integrados, por sua vez, se remetem aos primórdios da agricultura antiga, porém não se tratando de novas tecnologias, mas sim de conceitos. Já a agricultura contemporânea, decorrente da revolução verde, se tornou especializada e simplificada, no entanto, altamente dependente de insumos intemos, o que aumentou os riscos operacionais e teve, por consequência, impactos ambientais indesejáveis. Contudo, os sistemas de integração vieram ganhando mais visibilidade, pois seus atributos de sustentabilidade são únicos e se impõem com uma nova lógica de intensificação sustentável, no qual é exigida para o futuro da produção mundial.

Os sistemas integrados como ILPF, ILP, ILF, são constituintes de uma das mais importantes formas de uso da terra, atingindo 25 milhões de km² em todo o mundo; e nesse cenário a ciência brasileira apresenta ao mundo o uso desse conceito de produção sob os pilares da agricultura conservacionista.

O plantio direto e sua exigência em cobertura do solo, aliado à diversidade de rotações mais o efeito do pastejo, interagem de forma sinérgica, aportando novas propriedades aos sistemas integrados. O resultado, no âmbito de sistema, é maior que a soma das contribuições das tecnologias individuais, em que se depreende a aplicação do conceito de propriedades emergentes.

5. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Barbosa, localizada no município de Brejo - MA (03 42' 44" S; 42 55' 44" W e 55 m de altitude). O padrão climático da região, segundo a classificação climática de Koppen-Geiger, é do tipo Aw, tropical com duas estações do ano bem definidas, a estação chuvosa (dezembro-julho) e a estação seca (julho-novembro), conforme Aparecido et al. (2022). A precipitação pluvial média é de 1.835 mm, a temperatura máxima média é de 32° C e a mínima média é de 23°C. O solo da área do estudo é classificado predominantemente como Argissolo.

O estudo avaliou a resistência mecânica do solo à penetração em dois agroecossistemas. O primeiro consiste em uma área sob cultivo de soja (*Glycine max*) em sistema de semeadura direta por 18 anos sobre palhada de milho (*Pennisetum glaucum* (L.)). Em 2003, houve retirada da vegetação nativa de Cerrado e implantação de agricultura mecanizada, com preparo convencional e intensa mobilização do solo, uso de corretivos e fertilizantes, com incorporação de 2 t ha⁻¹ calcário calcítico. Em 2004 foram adotadas práticas conservacionistas de manejo do solo, com preparo reduzido e plantio de soja. Em 2005 iniciou-se o plantio direto, o qual é mantido até os dias atuais com a sucessão com soja/milho.

O segundo agroecossistema avaliado foi uma área de Integração lavoura-floresta, que foi desmatada no ano de 2004 e, no ano seguinte, foi realizado o cultivo do arroz de terras altas. No ano de 2006 a 2010, cultivou-se soja em sistema de monocultivo. A partir de 2011 foi adotado o plantio da *Urochloa brizantha* cv. Marandu consorciado com milho, sendo usada para o pastejo de bovinos após a colheita do milho. Posteriormente foi realizado o cultivo sucessivo de soja/milho, até a implantação dos renques de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) em 2017. Na primeira semana de fevereiro de 2017 foi implantado o consórcio de milho com forrageiras entre renques. No período de 2018 a 2021, foi realizado o cultivo de soja nos entre renques de eucalipto (sem revolvimento do solo). A soja foi cultivada como cultura principal e o milho (ADR300) foi cultivado como cultura de cobertura na entressafra (após a colheita da soja). Em 2023, foi realizado o cultivo de amendoim (*Arachis hypogaea* L) nos entre renques de eucalipto.

A coleta da resistência mecânica do solo à penetração do solo foi realizada em 28 de outubro de 2023 na safra 23/24, antes das chuvas. Anteriormente às coletas, não se realizou nenhuma operação de revolvimento do solo entre as áreas avaliadas. Os dados foram coletados com auxílio de um penetrômetro digital da Falker modelo PenetroLOG 2040 (capacidade de até 100 Mpa), seguindo a metodologia descrita detalhadamente por Stolf (1991). As avaliações foram realizadas na profundidade de até 20 cm, de forma aleatória em ambos os agroecossistemas avaliados. Foi realizada uma amostragem com grade regular com 75 pontos georreferenciados em cada área, na malha amostral foram realizadas as leituras de resistência mecânica a penetração do solo com espaçamentos de 20 metros no sentido Norte-Sul e 15 metros Leste-Oeste, conforme mostra a Figura 1 e 2. Para obtenção das coordenadas dos pontos amostrais, foi utilizado um receptor GNSS portátil Garmin®, modelo GPSMAP 65.

Figura 1 - Amostragem em grade regular do sistema convencional



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 2 - Amostragem em grade regular do sistema Integração Lavoura Floresta



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A estatística descritiva (média, mediana, valor máximo e mínimo, desvio-padrão, coeficiente de variação, entre outros) foram realizadas com o objetivo de caracterizar a tendência das medidas centrais e de dispersão dos dados, bem como expressar a distribuição. Para avaliar o coeficiente de variação (CV), foi usada a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), considerando baixa variabilidade para valores inferiores a 12%, variabilidade média entre 12% e 60%, e alta variabilidade para valores acima de 60%, conforme outros trabalhos publicados (RESENDE et al., 2014; NETO et al., 2021).

Os mapas foram produzidos com base na teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA, 2000). Os dados de resistência mecânica do solo à penetração foram convertidos em um arquivo no formato shapefile no *software* QGIS 3.22.4. O método da interpolação empregado para construção dos mapas temáticos foi a krigagem ordinária (1) com a estrutura e a dependência espacial estabelecida pelo semivariograma (2), utilizando o modelo teórico linear de variogramas (3) via algoritmo *System for Automated Geoscientific Analyses* - SAGA 7.8.2. A seleção do modelo teórico de variograma foi realizado com base no melhor desempenho, considerando o erro quadrático médio (EQM), conforme equação 4.

$$\underline{Z}(S_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z(S_i) \quad (1)$$

Onde: $Z(S_o)$ é o valor interpolado na posição S_o ; λ_i é o peso atribuído ao i -ésimo valor amostrado na posição S_i ; $Z(S_i)$ é o valor atribuído amostrado; n é o número de localidades vizinhas empregadas para interpolação do ponto; e o somatório dos pesos λ_i deve ser igual a 1 e $0 \leq \lambda_i \leq 1$.

$$\underline{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{N(k)} [Z(x_i) - Z(S_i+h)]^2 \quad (2)$$

Onde: $\underline{\gamma}(h)$ é o semivariograma; h é a distância de separação entre as medidas, $N(k)$ é o número de pares experimentais de dados medidos de $Z(x_i)$ e $Z(S_i+h)$, $Z(S_i)$ é o valor da variável para posição S_i não estimado (verdadeiro) considerada como uma variável aleatória, função da posição da amostragem x , $Z(S_i+h)$ é o valor da mesma variável na posição S_i+h em qualquer direção

$$\gamma(h) = c + b * h \quad (3)$$

Onde: $\gamma(h)$ é o semivariograma a uma distância (h), c é a contribuição do patamar de variabilidade, b é a inclinação que representa a taxa de variação espacial, e h é a distância entre os pontos.

Os modelos teóricos de variogramas foram ajustados ao semivariograma experimental. O critério de avaliação de desempenho entre os modelos foi realizado utilizando o erro quadrático médio (EQM), conforme equação 5.

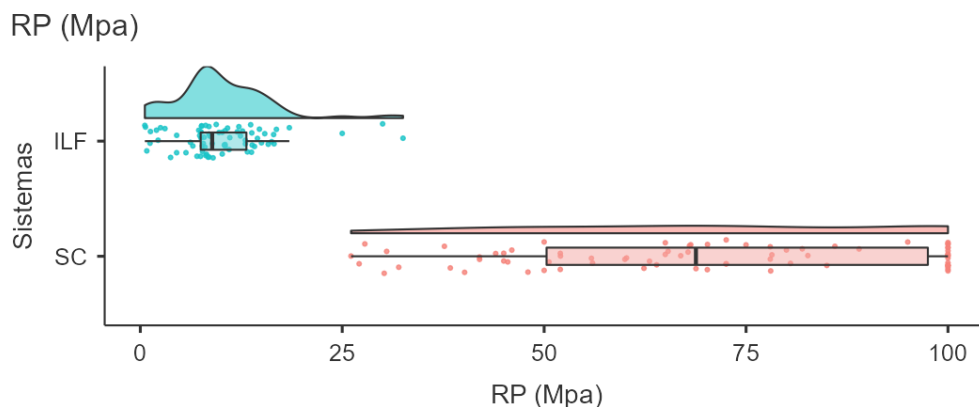
$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)}{\sigma_i} \right]^2 \quad (4)$$

Onde: $Z(x_i)$ é o valor previsto, $Z(x_i)$ é o valor observado, N é o número de valores e σ_i é o erro padrão para localização x_i .

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise estatística da resistência mecânica do solo à penetração entre os agroecossistemas avaliados são demonstrados na Figura 3. No Sistema de Integração Lavoura Floresta (ILF), a média de resistência mecânica do solo a penetração (RP) alcançou 10,1 Mpa, com um erro padrão de 0,676 Mpa. O coeficiente de variação foi calculado em 57,92%, refletindo uma dispersão significativa nas condições de resistência do solo no contexto do ILF. Os valores extremos de RP variaram de 0,56 Mpa a 32,4 Mpa. Além disso, observou-se que a média de profundidade das medições de RP foi de 10,7 cm, com um erro padrão de 0,671 cm e um coeficiente de variação de 33,8%, com amplitude de 5 cm a 20 cm, evidenciando uma considerável variabilidade nas profundidades de coleta dentro desse sistema (Figura 4), mas dentro da capacidade de medição do penetrômetro digital utilizado (<100 Mpa).

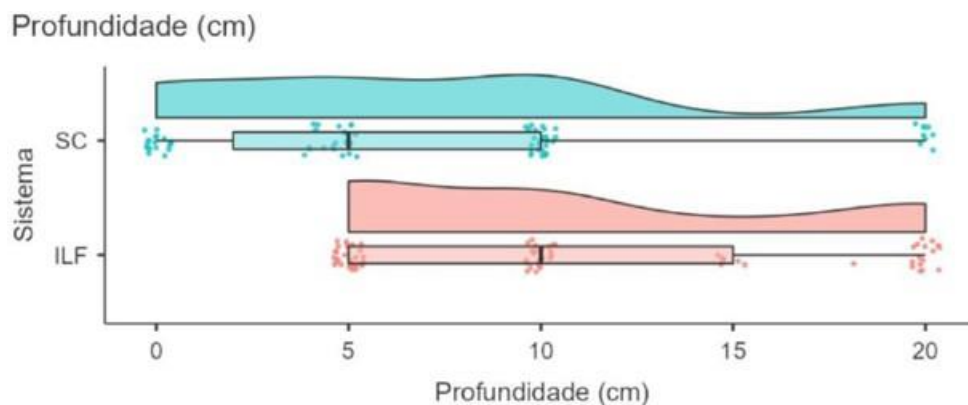
Figura 3 – *Boxplot's* e diagramas de densidade da resistência mecânica do solo à penetração nos agroecossistemas de Integração Lavoura Floresta (ILF) e Sistema Convencional de Semeadura Direta (SC)



No Sistema Convencional de Semeadura Direta (SC), a média de resistência foi numericamente maior, totalizando 69,8 Mpa, com um erro padrão de 2,704 Mpa. Os valores das medições variaram de 26,09 Mpa a 100 Mpa, indicando que em certos pontos amostrais apresentaram valores de RP acima da capacidade de medição do penetrômetro digital utilizado (<100 Mpa), com mostra a Figura 4. O coeficiente de variação calculado em 33,55% para o SC, sugere uma menor

dispersão em relação à média, apontando para uma homogeneidade relativamente maior nas condições de RP.

Figura 4 – *Boxplot's* e diagramas de densidade da profundidade de coleta das medições de resistência mecânica do solo à penetração nos agroecossistemas de Integração Lavoura Floresta (ILF) e Sistema Convencional de Semeadura Direta (SC).



A maior homogeneidade observada no Sistema Convencional (SC) pode ser explicada pelo fato, de várias regiões na área de estudo apresentarem valores superiores a 100 MPa. A média da profundidade das coletas no SC foi de 7,11 cm, com um erro padrão de 0,71 cm e um coeficiente de variação de 37,8%. Entretanto, é relevante ressaltar que os valores extremos variaram de 0 cm a 20 cm, indicando que em alguns pontos de amostragem não foi possível realizar a coleta de resistência à penetração (RP) devido aos valores ultrapassarem a capacidade de medição do penetrômetro utilizado (>100 MPa), como mostra a Figura 4.

De acordo com o teste t de *student* e F de Fisher, a resistência mecânica do solo à penetração foi significativamente maior no SC em comparação com o ILF. Essa inferência também pode ser observada no intervalo de confiança documentado para os agroecossistemas, que não se sobrepõem (Tabela 1). Esse resultado pode ser atribuído pois segundo Barros et.al (2012) os sistemas de integrações têm como mitigar emissões de gases de efeito estufa; reduzir a erosão e a perda de fertilidade dos solos, bem como o assoreamento dos cursos d'água, a poluição do solo, e da água, dentre outros. Nesse sentido, os sistemas integrados de produção agrícola e pecuária são considerados como tecnologia chave e sustentável para se atingir

esses objetivos, surgindo que o emprego desse manejo pode contribuir para melhorar os atributos físicos do solo nas condições específicas de cultivo do Leste Maranhense.

Neste estudo, foi constatado que o sistema convencional de semeadura direta ocasionou elevados índices de resistência mecânica na penetração do solo. Essa constatação encontra respaldo no estudo conduzido por Machado et al. (2023), o qual identificou que esse aumento na resistência mecânica é causado pelo incremento do nível de compactação do solo, resultando em alta densidade e reduções da macroporosidade e porosidade total na camada superficial do solo, principalmente na área onde a semeadura direta convencional é aplicada.

Então, os benefícios acrescidos pelos sistemas de integrações, nas propriedades física do solo, como já mencionado em estudos anteriores e, segundo Neres et.al (2023), buscam a conciliação de diferentes sistemas de produção ILP, ILPF, ILF, visando otimização da área produtiva.

Esses sistemas de integração apresentam baixa emissão líquida de gases do efeito estufa, o que contribui para a redução do aquecimento global. Essa característica é um dos fatores que tornam esses sistemas sustentáveis. Além disso, eles proporcionam benefícios para o solo, como aumento da matéria orgânica, melhor ciclagem de nutrientes, menor perda de umidade, menor risco de erosão e descompactação do solo pelas raízes. Essa diversificação também resulta em menor incidência de doenças, pragas e de plantas daninhas

Tabela 1 – Média \pm erro padrão da média dos valores de resistência mecânica do solo à penetração (RP) nos agroecossistemas de Integração Lavoura Floresta (ILF) e Sistema Convencional de Semeadura Direta (SC).

Sistemas	RP	DP	CV (%)	P valor	Intervalo de Confiança		
					LI	IC	LS
ILF	10,1 \pm 0,676	5,85	57,92	<0,01	8,73		11,4
SC	69,8 \pm 2,704	23,42	33,55		23,42		26,09

Médias seguidas por letras diferentes na coluna são estatisticamente diferentes pelo teste T e F a um nível de 5% de significância. DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação; IC = Intervalo de Confiança; LI = Limite inferior e LS = Limite superior.

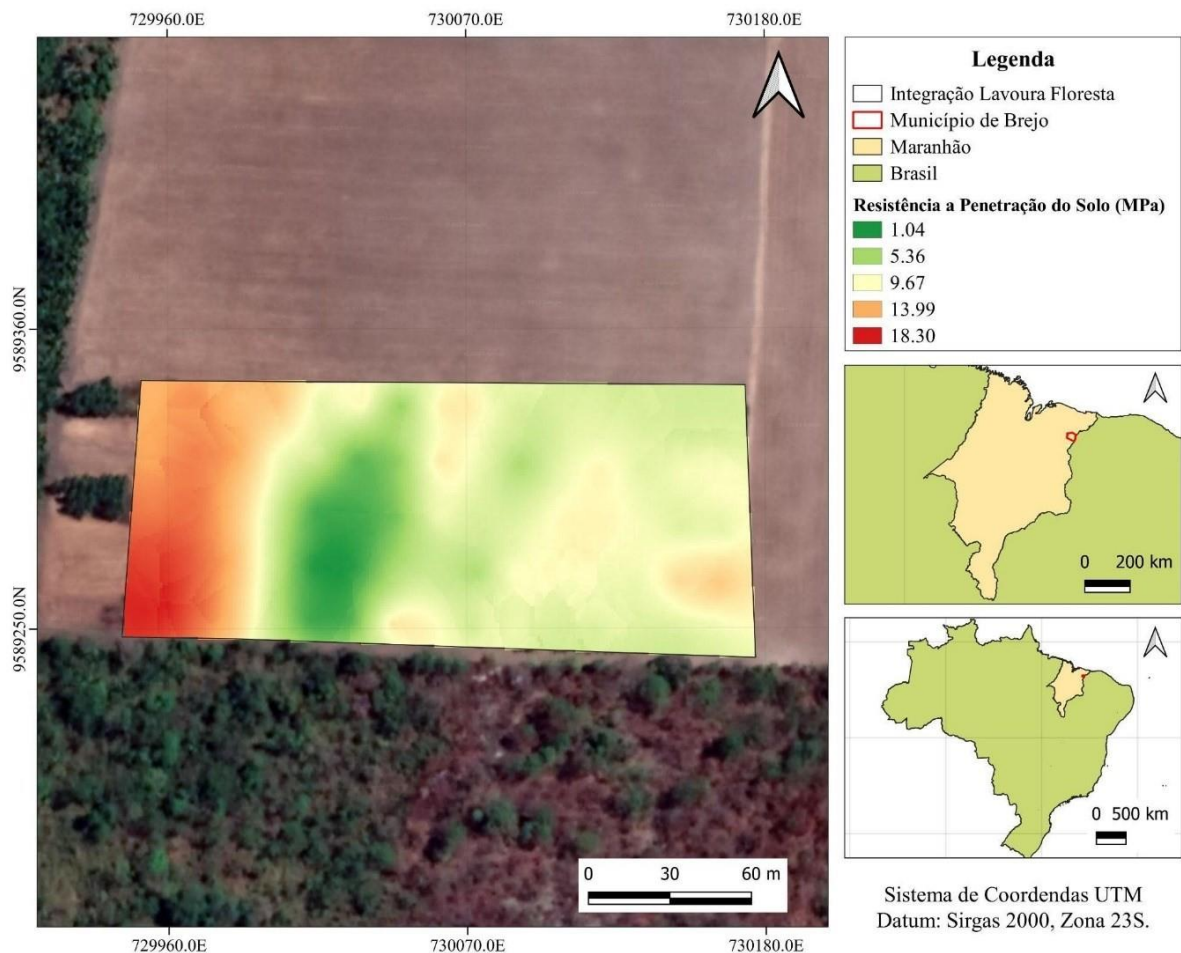
Adicionalmente, é importante destacar o histórico da área do ILF investigada no presente estudo. Em 2023, realizou-se o cultivo de Amendoim (*Arachis hypogaea*

L) entre os renques. Essa cultura possui um sistema radicular pivotante, que pode chegar até 100 cm de profundidade. Dessa forma, evidencia-se a importância não apenas da profundidade das raízes, mas também da rotação de culturas e sistemas integrados, como o ILF, para a promoção de uma estrutura de solo mais resiliente, com menor resistência mecânica à penetração e melhores condições para o desenvolvimento das plantas.

Neste estudo, durante a avaliação da RP na área do SC, aproximadamente 16 pontos amostrais, dentre os 75 georreferenciados, não foi possível obter a estimativa da RP utilizando o penetrômetro digital. Vale destacar que a coleta foi realizada antes das chuvas para a safra 23/24, caracterizando um período seco e acentuada estiagem, que resultou na escassez de umidade no solo. Esse cenário contribuiu para a formação de um perfil de solo coeso, com maior agregação das partículas, culminando em uma alta resistência mecânica à penetração. Assim, essa dificuldade na obtenção de dados de RP destaca a influência direta das condições climáticas sazonais na variabilidade do Leste Maranhense, enfatizando a importância de considerar fatores climáticos ao interpretar os resultados.

A geoespacialização dos dados de RP na área de ILF pode ser visualizada na Figura 5. Destaca-se que os valores mais elevados de RP se concentram predominantemente na região oeste da área, identificada por uma coloração vermelho-alaranjada. Por outro lado, as zonas que exibem tonalidades de verde escuro e claro, variando entre 1,04 e 5,36 Mpa, estão concentradas na região central e noroeste da área de ILF. Essa distribuição espacial dos valores de RP oferece *insights* sobre a variabilidade da resistência do solo na área estudada, apontando para possíveis padrões relacionados a fatores geográficos ou de manejo.

Figura 5 – Mapa temático da resistência mecânica do solo à penetração nos agroecossistemas de Integração Lavoura Floresta (ILF)



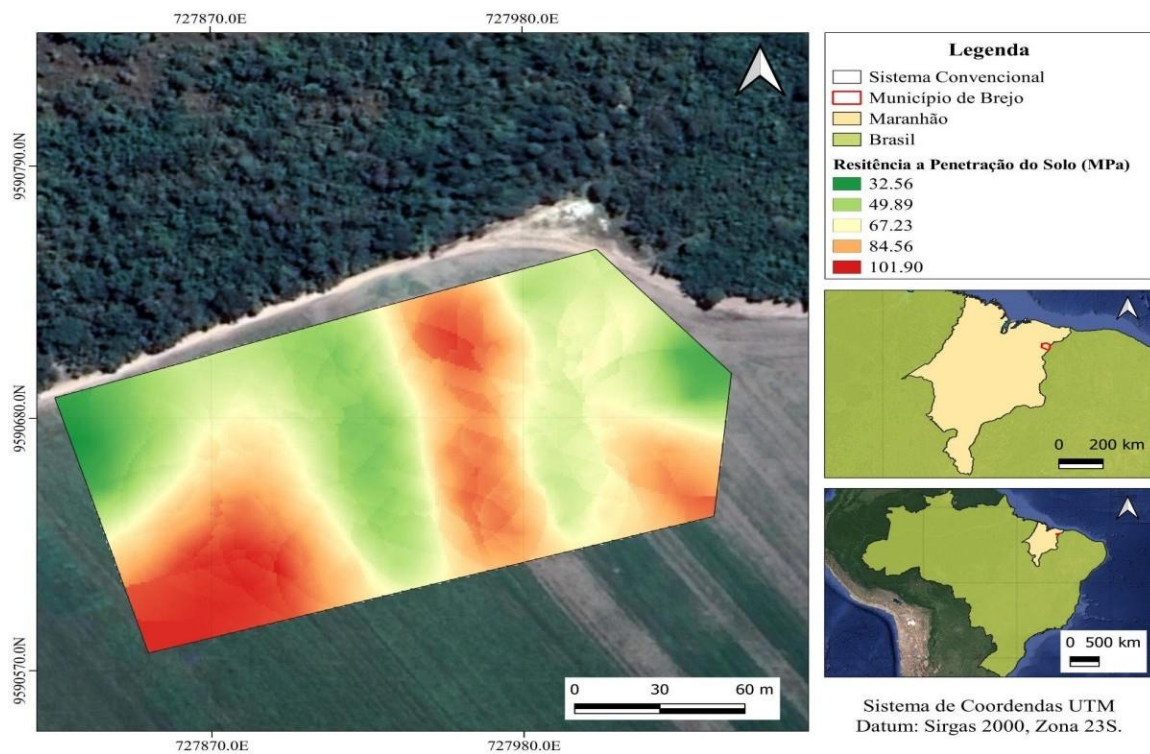
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Sobre os resultados observados com a geoespacialização da RP na área de ILF, a maior RP observada na região oeste da área pode ser atribuída provavelmente ao maior tráfego de maquinários durante as operações agrícolas, isso porque especificamente esta região não possui eucaliptos, como por observado Figura 5. Perante o discutido a utilização excessiva de máquinas e implementos agrícolas e o aumento desse tráfego em áreas de produção são alguns dos pontos que causam prejuízos à qualidade do solo, ocasionando alterações físicas, como alta compactação, ligeiramente visto na Figura 5, que são os principais fatores que inviabiliza a atividade agrícola no campo.

Na Figura 6, observa que os valores registrados para RP na área SC são consideravelmente maiores em comparação com o sistema ILF. Especificamente na área do SC as maiores concentrações de RP ocorrem na região sudoeste, e na

porção central da área no sentido norte sul na área, identificada por uma coloração vermelho-alaranjada. Para que no sistema houvesse representação cartográfica, como visto no mapa, certas faixas ao longo das coletas foram atribuídas como RP igual a 100 Mpa. No entanto, esses valores estão subestimados, uma vez que nessas áreas supracitadas a força exercida no penetrômetro digital deve ser superior a 100 Mpa, impossibilitando a coleta pela escala do equipamento utilizado no presente estudo.

Figura 6 – Mapa temático da resistência mecânica do solo à penetração nos agroecossistemas de Sistema Convencional de Semeadura Direta (SC).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

7. CONCLUSÃO

O emprego de sistemas integrados pode contribuir para reduzir a resistência mecânica do solo à penetração nas condições específicas de cultivo do Leste Maranhense.

REFERÊNCIAS

Aguiar, M. I. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Viçosa: UFV, 2008. 91p. Dissertação Mestrado

ALMEIDA, J.G.; SODRÉ, R.B.; JÚNIOR, J.S.M. O Matopiba nas Chapadas Maranhenses: Impactos da expansão do agronegócio na microrregião de Chapadinha. **Revista Nera**. Presidente Prudente. v. 22, n.47, p. 248-271, 2019

AMADO, T. J. C.; PES, L. Z.; LEMAINSKI, C. L.; SCHENATO, R. B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 831-843, 2009

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v. 13, n.4, p. 382-388, 2009

APARECIDO, L.E. et al Uniformizar. Climate classification by Thomthwaite (1948) humidity index in future scenarios for Maranhão State, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02082-9>

BALBINO, L.C.; BARCELLOS, A. de O.; STONE, L.F. **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF)**. Brasília: Embrapa, 2011. 130p.

BARROS, L. R.; RIBON, A. A.; FERNANDES, K. L.; SOUZA, J. L. O.; CARRECHEL, V.; BACKES, C.; SANTOS, A. J. M.; ALVES, A. R. Integrated managements systems for te improvement of the physical quality of a Cerrado Oxisol. **Australian Journal of Crop Science, Camberra**, v. 12, n. 5, p. 711-716, 2018

BATISTA, M. L. B., ALVES, J. S., ALVES, C. L. B., ANDRÉ, D. M. (2023). Análise fatorial e espacial da modernização agrícola no MATOPIBA. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 61(3), e261413. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.261413>

- BERTONI, J.; NETO, F. L. **Conservação do Solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355p. BOLFE, E.L.; VICTÓRIA, D.C.; CONTINI, E.; BAYMA-SILVA, G.; SPINELLI-ARAÚJO, L.; GOMES, D. Matopiba em crescimento agrícola: aspectos territoriais e socioeconômicos. **Revista de Política Agrícola**. Ano XXV, n.4, out/nov/dez. 2016
- BOTTEGA, E.L.; BOTTEGA, S.P.; SILVA, S.A.; QUEIROZ, D.M.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L. Variabilidade espacial da resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife-PE, v.6, n.2, p.331-336, abr-jun, 2011
- DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120, p.201-214, 2004
- GOMES, N. M.; FARIA, M. A.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 427-435, 2007.
- GREGO, C.R.; OLIVEIRA, R.P.; VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: Alberto Carlos de Campos Bernadi, [et.al], editores técnicos. **Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar**. Ed: 1. Brasília-DF: Cubo, 2014, p. 73- 84
- LAMPARELLI, R.A.C.; **Agricultura de Precisão**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/avanco-tecnologico/agricultura-de-precisao>. Acesso em: 12/set. 2023
- LANDAU, E.C.; GUIMARÃES, D.P.; SOUSA, D.L. Expansão geográfica da agricultura irrigada por pivôs centrais na região do Matopiba entre 1985 e 2015. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Sete Lagos, n. 136, 2016

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

MACHADO, M.T.; SOUSA, C.M.A.; ARCOVERDE, S.N.S; CHAGAS, A.; OLSZEWSKI, N.; CORTEZ, J.W. Níveis de compactação e sistemas de preparo sobre atributos físicos do solo e componentes de produção da soja. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 16, n. 56, e17037, 2023.

MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; ANCEV, T.; BOUMA, J. Future directions of Precision Agriculture. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8>

MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 6, p. 567-573, 2008.

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.) **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p. 1-18.

NASCIMENTO, D. M.; CAVALIERI POLIZEIJ, K. M. V.; SILVA, A. H.; FAVARETTO, N.; PARRON, L. M. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 186, n. 1, p. 292-299, 2019.

NETO, E.S.B.; RUSSINI, A.; AMARAL, L.P.; PINHO, P.J.; FARIAS, M.S.; GIACOMELI, R. Spatial variability of soil penetration in the lowland area cultivated with soybean. **Ciência Rural**. Santa Maria-RS, v.51:6, 2021.

NETO, F.C.C, SAMPAIO, F.M.T, VELOSO, M.E.C, MATIAS, S. S.R, ANDRADE, F.R, LOBATO, M.G.R. Variabilidade espacial da resistência à penetração em Neossolo Litólico Degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Bom Jesus-PI, v. 39, p.1353-1361, 2015

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Adv. Agronomy**, v. 67, p.1-85, 1999.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; SUZUKI, L.E.A.S. Qualidade física do solo. **Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água**. Aracaju-SE, p. 1-30. 2016

RESENDE, J.M. A.; JÚNIOR, J.M.; FILHO, M.V.M.; DANTAS, J.S.; SIQUEIRA, D.S.; TEIXEIRA, D.B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste maranhenses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:1077-1090, 2014

RICHART, A.; PICCIN, A.L.; KONOPATZKI, M.R.S.; KAEFER, K.A.C.; MORATELLI, G.; KAEFER, J.E.; ECCO, M. Análise espaço-temporal de atributos químicos do solo influenciados pela aplicação de calcário de cloreto de potássio em taxa variável. **Scientia Agraria Paranaensis**. Marechal Cândido Rondon - PR, v.15, n.4, out/dez., p. 391-400, 2016. <http://dx.doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v15n4p391-400>

RODRIGUES, M.S.; CASTRIGNANO, A.; BELMONTE, A.; SILVA, K.A.; LESSA, B.F.T. Estatísticas e suas potencialidades na agricultura 4.0. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza-CE. v.51, 2020

SABINO, B.T.S.; OLIVEIRA, F.P.; SILVA, P.L.F.; NOBREGA, C.C.; DIAS, B.O.; CAMPOS, M.C.C. Qualidade de solo aos oito anos de condução sob sistemas integrados de produção agropecuária. **Revista Valore**, Volta Redonda, 8 (edição especial), 144-155, 2023

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 1095- 1103, 2009

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1339-1348, 2010

SILVA, A.L.; MARIANO, D.C.; EBLING, A.A.; NETO, C.F.O.; VIÉGAS, I.J.M.; OKUMURA, R.S. Geoestatística para o mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo em sistemas de manejo do solo na Amazônia brasileira. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente - RAMA**. Manaus-AM, v.16, n.1, 2023.

SILVA, F.J.; OLIVEIRA, C.A.A.; ALMEIDA, L.S.; LIMA, L.P.; GUIMARÃES, E.C. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e produtividade do milho. **Revista da Agricultura Neotropical**. Cassilândia-MS, v.4, n.3, p.77-84, jul-set. 2017

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D, J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**. Santa Maria-MS, v.34, n.2, p.399-406, mar-abr, 2004

SINGER, M.; EWING, S. Soil quality. In: Sumner, M. E. (ed.). Handbook of soil science. **Boca Raton**: CRC Press, 2000. p.271-298.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G.; SIQUEIRA, D. S. Spatial variability of soil attributes and sugarcane yield in relation to topographic location. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 250–1256, 2010

STEFANOSKI, D.C.; SANTOS, G.C.; MARCHÃO, R.L.; PETTER, F.A.; PACHECO, L.P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v. 17, n.12, p. 1301-130, 2013

STOLF, R. Methodology for gap evaluation on sugarcane lines. **STAB**. Piracicaba, v.4, n.6, p.12-20, jul./ago.,1991.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; BALBINO, L.C. & NEVES, C.S.V.J. Método do Perfil Cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista. Brasileira. Ciência do. Solo.**, 23:393-399, 1999

TISSEYRE, B., MCBRATNEY, A. B. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management using yield monitor data: Application to viticulture. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., 2007, Skiathos. **Proceedings**. 2007. p. 249-256.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Schaefer, C. E. (ed.) **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-54.

WHELAN, B. M. Reconciling continuous soil information and crop yield. 1998. 327 f. Tese (Doutorado)-The University of Sydney, Sydney, 1998.

WILKINS, R.J. Eco-efficient approaches to land management: a case for increased integration of crop and animal production systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B – Biological Sciences**, v.363, p.517-525, 2008