

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Diagnóstico da compactação do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar: métodos tradicionais e uso da condutividade elétrica aparente do solo obtida por sensor de indução eletromagnética

Daniel Aquino De Borba

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2022**

Daniel Aquino De Borba
Engenheiro Agrônomo

**Diagnóstico da compactação do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar:
métodos tradicionais e uso da condutividade elétrica aparente do solo obtida por
sensor de indução eletromagnética**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MAURÍCIO ROBERTO CHERUBIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

De Borba, Daniel Aquino

Diagnóstico da compactação do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar: métodos tradicionais e uso da condutividade elétrica aparente do solo obtida por sensor de indução eletromagnética / Daniel Aquino De Borba - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

83 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Compactação do solo 2. Ensaio de Proctor 3. Física do solo 4. Grau de compactação do solo I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a mim mesmo,
aos meus amigos
e a minha família.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP – ESALQ) foi um privilégio fazer parte da história desta instituição e a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas pelo crescimento profissional e pessoal adquiridos com o curso de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001-88887.513427/2020-00”. Gostaria também de agradecer a CROPMAN/Agro4S/SEBRAE/EMBRAPII pelo financiamento dessa pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Maurício Roberto Cherubin, um exemplo de pesquisador e cidadão, sendo fundamental para o desenvolvimento desta dissertação. Agradeço pela oportunidade, incentivo, constante positividade, apoio e a relação de amizade nestes anos.

Aos amigos de pós-graduação do grupo de pesquisa Soil Health & Management Research (SOHMA) Renato Paiva de Lima, Felipe Bonini da Luz, Beatriz da Silva Vanolli, Bruna Emanuele Schiebelbein, Martha Lustosa Carvalho, Victor Maciel Ferreira, Larissa de Souza Bortolo, Victoria Santos Souza, Maria Emília Marostica, Gabriela Marques Cardoso e Jorge Locatelli por serem meus parceiros de jornada. Obrigado pelos momentos felizes, companheirismo e auxílio nas análises. Técnico do laboratório de Física do Solo Reginaldo Nogueira (Rossi), pelos ensinamentos e auxílio nas análises físicas e pela parceria.

Aos meus caros amigos de Piracicaba que sempre estiveram presentes apoiando e criticando Alexander, Guilherme, Mateus Tonini, Maurício Martello, Letícia Frizzo, Graciele, Tairon, Isadora, Arthur, Fernando, Ana e Tamires.

Aos amigos graduandos do grupo de pesquisa Soil Health & Management Research (SOHMA) Matheus de Sá Altariugio, Gabriel M. M. Carneiro, Maria Julia Cavassuti, Marcos Augusto Bonini Pires e aos demais representados por eles.

Aos meus pais Nelson Lima de Borba e Rosa Nara Aquino de Borba, meus irmãos Ezequiel Aquino De Borba, Aline Aquino de Borba e minha cunhada Areane Pinheiro.

MUITO OBRIGADO.

Estabelecer metas é o primeiro passo
para transformar o invisível em visível.

Tony Robbins

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUÇÃO	11
2. GRAU DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS COM TEXTURAS CONTRASTANTES EM ÁREAS CULTIVADAS COM CANA-DE-AÇÚCAR.....	15
RESUMO.....	15
2.1. INTRODUÇÃO	16
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	19
2.2.1. Descrição das áreas de estudo	19
2.2.2. Curva e grau de compactação	20
2.2.3. Densidade do Solo	21
2.3. RESULTADOS	22
2.3.1. Curva de compactação do solo.....	22
2.3.2. Grau de compactação do solo	24
2.4. DISCUSSÃO.....	27
2.4.1. Curva de compactação do solo.....	27
2.4.2. Grau de compactação do solo	29
2.5. CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS.....	31
3. SENSOR DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS DE CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR	39
RESUMO.....	39
3.1. INTRODUÇÃO.....	40
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	43
3.2.1. Descrição das áreas de estudo	43
3.2.2. Metodologia para mapeamento da CEa	43
3.2.3. Coleta e preparo das amostras.....	48
3.2.4. Resistência do Solo a Penetração.....	48
3.2.5. Avaliação Visual da Estrutura do Solo	48
3.2.6. Densidade do Solo	50

3.2.7. Porosidade Total do Solo.....	50
3.2.8. Resistência do Solo a Penetração em laboratório.....	51
3.2.9. Análises estatísticas	52
3.3. RESULTADOS	52
3.3.1. Indicadores de compactação do solo	52
3.3.2. Indicadores de porosidade e VESS.....	56
3.3.3. Comportamento dos atributos físicos para diferentes texturas do solo	59
3.3.4. Grau de compactação do solo GC e Carbono orgânico do solo	63
3.3.5. Correlações entre indicadores físicos do solo nas diferentes áreas	65
3.3.6. Correlações entre todos os atributos com a frações granulométricas.....	67
3.4. DISCUSSÃO	67
3.5. CONCLUSÃO.....	72
REFERÊNCIAS	73
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	83

RESUMO

Diagnóstico da compactação do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar: métodos tradicionais e uso da condutividade elétrica aparente do solo obtida por sensor de indução eletromagnética

A mecanização agrícola transformou o cultivo de cana-de-açúcar nas últimas décadas, e cooperou para o aumento da eficiência e a expansão do cultivo. Entretanto, esta modernização da mecanização agrícola ocorreu por meio do uso contínuo e sucessivo de equipamentos grandes e pesados, causando degradação física do solo pelo tráfego agrícola. Estes efeitos são ainda mais intensos em sistemas agrícolas altamente mecanizados, como o da cana-de-açúcar. Neste contexto, o Brasil tem se destacado, por ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com aproximadamente 40% da produção global, totalizando mais de 10 milhões de ha de produção. Todavia, os canaviais brasileiros tem apresentado sérios problemas com compactação do solo, devido as tensões induzidas no solo pelo maquinário agrícola. Assim, é necessário compreender o grau de compactação para se buscar formas de mensurar e mitigar a compactação do solo. Amparado nisso, nesta pesquisa foi avaliado o grau de compactação do solo, bem como, foi utilizado um sensor de indução eletromagnética para identificação de compactação do solo, ambos em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. O estudo foi realizado em oito locais na região centro-sul do Brasil, em solos com textura variando de franco arenoso a muito argiloso. Em cada área avaliou-se a densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$), umidade crítica do solo (U_{cr}), grau de compactação do solo (GC) através do Ensaio de Proctor normal, e parâmetros físicos tradicionais com amostras indeformadas (densidade do solo atual (D_s), porosidade total do solo (Pt), resistência do solo a penetração na capacidade de campo (RPI)). No campo foi realizada avaliação visual da estrutura do solo (VESS) e resistência do solo a penetração (RPC). Além disso, foi realizado o mapeamento do solo para o diagnóstico do grau de compactação via sensor de indução eletromagnética de condutividade elétrica aparente do solo. No Capítulo 1, os resultados demonstraram que a $D_{s_{máx}}$ aumenta em solos com baixos teores de argila. O conteúdo de água no solo necessário para chegar ao ponto de máxima compactação do solo é maior para teores de argila maiores. O manejo do cultivo de cana-de-açúcar está degradando a qualidade física do solo, independente da textura ou ciclo da cultura. Devido a compactação do solo as densidades encontradas foram maiores que as densidades referências encontradas pelo ensaio de Proctor normal, tal situação resultou em GC maiores de 100%, mostrou que o aumento e intensificação de máquinas agrícolas, a densidade tem sido severamente afetada. A densidade de referência obtida por Proctor normal precisa ser revista para o atual cenário de tráfegos agrícolas. No capítulo 2, os métodos tradicionais não apontaram discriminação das zonas de compactação, diferindo dos resultados do sensor eletromagnético com base na CEa do solo, que discriminou diferentes regiões de compactação. Conclui-se que necessita novos estudos sob estados de compactação do solo em ambiente controlado. Necessita-se estudar fatores adicionais que alteram a CEa para obter melhores respostas.

Palavras-chave: Física do solo, Condutividade elétrica aparente do solo, Textura do solo, Parâmetros físicos do solo

ABSTRACT

Diagnosis of soil compaction in sugarcane growing areas: traditional methods and use of apparent soil electrical conductivity obtained by electromagnetic induction sensor

Agricultural mechanization has transformed sugarcane cultivation in recent decades, and has contributed to increasing efficiency and expanding cultivation. However, this modernization of agricultural mechanization occurred through the continuous and successive use of large and heavy equipment, causing physical degradation of the soil by agricultural traffic. These effects are even more intense in highly mechanized agricultural systems, such as sugarcane. In this context, Brazil has stood out as the world's largest producer of sugarcane with approximately 40% of global production, totaling more than 10 million ha of production. However, Brazilian sugarcane plantations have presented serious problems with soil compaction, due to the tensions induced in the soil by agricultural machinery. Thus, it is necessary to understand the degree of compaction to find ways to measure and mitigate soil compaction. Based on this, in this research the degree of soil compaction was evaluated, as well as an electromagnetic induction sensor was used to identify soil compaction, both in sugarcane cultivation areas. The study was carried out at eight sites in the central-south region of Brazil, in soils with textures ranging from sandy loam to very clayey. In each area, maximum soil density (D_{smax}), critical soil moisture (U_{cr}), soil compaction degree (GC) were evaluated through the normal Proctor test, and traditional physical parameters with undisturbed samples (current soil density (D_s), total soil porosity (Pt), soil penetration resistance at field capacity (RPI)). In the field, a visual assessment of soil structure (VESS) and soil penetration resistance (R_{Pc}) was carried out. In addition, soil mapping was carried out to diagnose the degree of compaction via an electromagnetic induction sensor for the apparent electrical conductivity of the soil. In Chapter 1, the results showed that D_{smax} increases in soils with low clay contents. The soil water content required to reach the maximum soil compaction point is higher for higher clay contents. The management of sugarcane cultivation is degrading the physical quality of the soil, regardless of the texture or cycle of the crop. Due to soil compaction, the densities found were higher than the reference densities found by the normal Proctor test, this situation resulted in GC greater than 100%, showing that the increase and intensification of agricultural machinery, the density has been severely affected. The reference density obtained by normal Proctor needs to be revised for the current agricultural traffic scenario. In chapter 2, the traditional methods did not show discrimination of the compaction zones, differing from the results of the electromagnetic sensor based on the E_{Ca} of the soil, which discriminated different regions of compaction. It is concluded that further studies are needed under soil compaction states in a controlled environment. It is necessary to study additional factors that alter the E_{Ca} to obtain better answers.

Keywords: Soil physics, Apparent electrical conductivity of the soil, Soil texture, Physical parameters of the soil

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar tem grande relevância em escala global na produção de bioenergia, se destacando no Brasil, o qual é responsável por 40% da produção global. No Brasil, a cultura é cultivada predominantemente em duas regiões: costeira do nordeste – onde iniciou-se os cultivos e atualmente são cultivados cerca de 8% da produção nacional, e a região Centro-Sul – onde a cultura se expandiu, tornando-se o principal polo de produção nacional (92%). Na região Centro-Sul, o cultivo de cana-de-açúcar tem se destacado pela modernização e mecanização dos sistemas de colheita a partir de meados do ano 2000, substituindo a colheita manual e com queima da palha por uma colheita mecanizada, sem necessidade de queima. Porém, o sucessivo tráfego de máquinas na operação de colheita tem ocasionado compactação do solo, gerando uma série de impactos negativos à cultura e a outros serviços ecossistêmicos do solo (e.g., regulação do fluxo hídrico, estocagem de carbono, habitat para a biodiversidade e controle de erosão).

A compactação do solo é um processo de degradação física (Figura 1) que ocorre principalmente devido ao tráfego intenso de máquinas pesadas ao longo do ciclo de cultivo da cana-de-açúcar. As principais consequências da compactação do solo estão associadas com a degradação da estrutura do solo e inclui alteração do diâmetro, continuidade e conectividade de poros, o que prejudica o fluxo de gases e água ao longo do perfil do solo. Além disso, ocorre redução de macroporos que afeta funções hidrológicas do solo, como por exemplo infiltração e condutividade hidráulica. Por outro lado, ocorre aumento do escoamento e perda de solo por processos erosivos. Nas plantas a compactação afeta o crescimento radicular em profundidade e conseqüentemente altera a dinâmica de absorção de água e nutrientes (Figura 1). Portanto, além do efeito na estrutura do solo, a compactação afeta negativamente os processos químicos e biológicos do solo, reduzindo a qualidade do solo e conseqüentemente a produtividade dos canaviais.

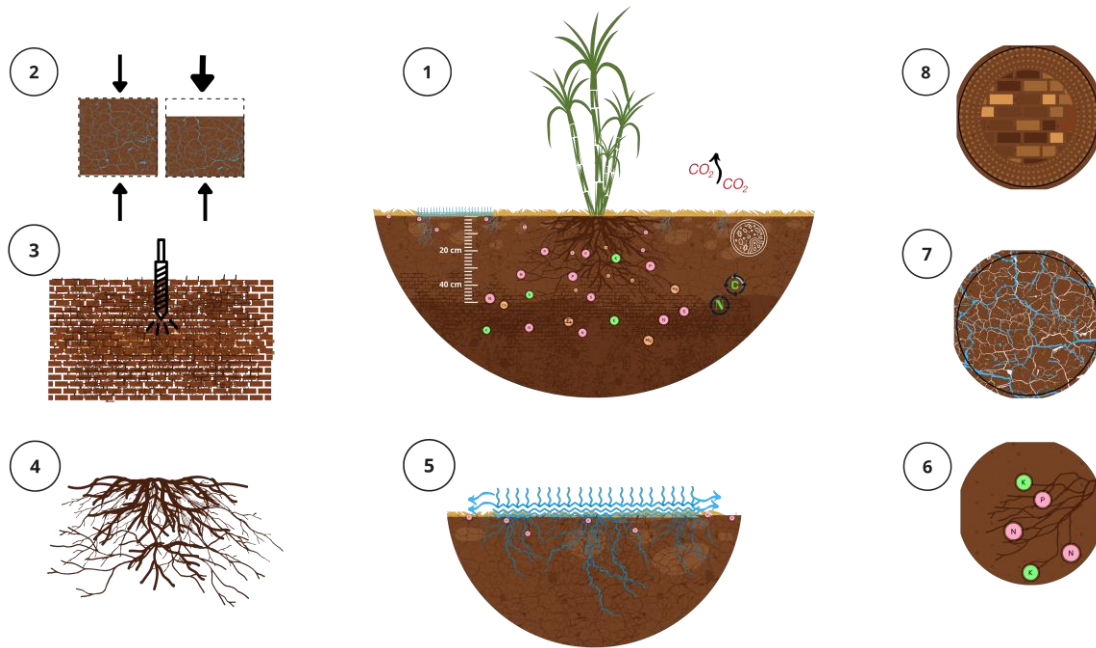


Figura 1. Esquema ilustrando as alterações induzidas pela compactação do solo, em que: (1) relação solo-planta e seus efeitos diretos e indiretos; (2) aumento da densidade do solo e alteração na porosidade do solo; (3) zona compactada com maior resistência do solo a penetração; (4) redução da taxa de crescimento radicular; (5) redução da taxa de infiltração, aumento do escoamento superficial e esgotamento de nutrientes por erosão; (6) redução do volume explorado pelo sistema radicular, e consequente deficiência nutricional na planta; (7) alteração no diâmetro e conectividade dos poros; (8) baixa qualidade estrutural.

Dada a importância da compactação do solo em sistemas de produção de cana-de-açúcar e outras culturas agrícolas, um dos principais desafios está na metodologia e na viabilidade econômica e técnica do diagnóstico da compactação em larga escala. Métodos tradicionais, incluindo parâmetros como a densidade do solo e o grau de compactação têm sido utilizados, mas ficam restritos a áreas experimentais, com poucos adeptos em sistemas de produção de larga escala. Enquanto a densidade do solo permite comparações somente entre áreas com mesma textura do solo, o grau de compactação do solo tem uso mais abrangente, por ser um parâmetro normalizado que independe da textura. Porém, a utilização de métodos tradicionais como densidade do solo, grau de compactação, assim como porosidade total, resistência a penetração tem enormes limitações de escalabilidade no campo, devido à alta demanda de mão-de-obra e tempo necessário para avaliação. Portanto, com este aumento nos riscos de compactação evidenciadas se busca a necessidade de novas formas de atenuar e evitar este processo, através disso, formas mais rápidas de mensurar a compactação são necessárias.

Neste contexto, métodos alternativos e inovadores que permitam fazer o diagnóstico da compactação do solo em grande escala (preferencialmente diretamente no campo) são fundamentais para otimizar o manejo do solo nas áreas agrícolas. Dentre as diversas

alternativas, métodos geofísicos de sensoriamento proximal por indução eletromagnética, alguns exemplos destes métodos são: a condutividade elétrica aparente (CEa) e a resistividade do solo, sendo investigados como potenciais métodos para o diagnóstico do estado compactação do solo a campo para quantificar a variabilidade dos solos.

Ainda se tem poucas informações sobre o uso da CEa do solo, e pouco entendimento de sua relação com o estado de compactação do solo. Particularmente, devido à pouca ou ausência de dados em áreas de produção de cana-de-açúcar, onde o processo de compactação é muito intenso em áreas extensas. Com isso, hipotetizamos que o monitoramento da compactação do solo no atual cenário é importante para adoção de estratégias para atenuar a compactação para áreas de diferentes texturas em áreas de cana-de-açúcar devido o tráfego de máquinas, e com isso verificar novas metodologias que tenham potencial de quantificar e mapear áreas de compactação em grande escala de forma assertiva. Através disto, avaliar o processo de compactação para diferentes texturas e ciclos, e identificar a variabilidade espacial da compactação no solo e sua profundidade de ocorrência (através de zonas de compactação), via monitoramento direto e indireto da estrutura do solo através de métodos tradicionais e CEa por sensor de indução eletromagnética, visando manejos localizados para aumentar a eficiência e sustentabilidade do cenário agrícola canavieiro.

2. GRAU DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS COM TEXTURAS CONTRASTANTES EM ÁREAS CULTIVADAS COM CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

A compactação do solo em canaviais é ocasionada principalmente pela intensificação do tráfego de máquinas pesadas. O aumento de carga aplicada sobre o solo e repetibilidade de passagens efetuadas principalmente nas operações de colheita, reduz a qualidade física do solo, afetando a produtividade e o funcionamento do solo. A compactação do solo está presente na maioria dos solos cultivados com cana-de-açúcar, e é agravada quando as operações agrícolas são efetuadas com elevado conteúdo de água no solo. Entretanto, para que o manejo do solo seja mais assertivo, torna-se fundamental fazer o correto diagnóstico do estado de compactação do solo, o qual muda em função da textura e umidade do solo. O indicador que melhor representa a estado de compactação, é o grau de compactação do solo, i.e., a densidade atual do solo com relação a densidade máxima do solo. Assim, os objetivos deste estudo foram: (i) determinar o efeito da textura na curva de compactação do solo, (ii) definir o conteúdo de água crítico para máxima densidade do solo, (iii) definir a densidade máxima do solo e (iv) quantificar o grau de compactação de solos com texturas contrastantes, variando de 0,170 a 0,600 g kg⁻¹ de argila (franco arenoso a muito argiloso) em oito áreas de produção, na região Centro-Sul do Brasil. Em cada local foram coletadas amostras deformadas de solo e submetidas ao ensaio de Proctor normal (energia de compactação de 0,6 MJ m⁻³). Em laboratório as amostras de solo foram umedecidas, obtendo um gradiente de cinco conteúdos de água. Desta forma, obteve-se a densidade de Proctor normal para densidade máxima do solo e a umidade crítica do solo. Através de amostras indeformadas coletadas a campo calculou-se a densidade do solo atual. O conteúdo de água crítica no solo foi maior em solos argilosos para atingir a densidade máxima do solo que em solos arenosos. O grau de compactação do solo foi independente do teor de argila do solo. Foi encontrado grau de compactação >100%, com amplitudes de 92 a 120%. A compactação do solo esteve presente em todos os solos, com valores acima do grau de compactação, considerado crítico para desenvolvimento radicular. O manejo do cultivo de cana-de-açúcar está degradando a qualidade física do solo, independente da textura ou ciclo da cultura. Devido a compactação do solo as densidades encontradas foram maiores que as densidades referências encontradas pelo ensaio de Proctor normal, tal situação resultou em GC maiores de 100%, mostrou que o aumento e intensificação de máquinas agrícolas, a densidade tem sido severamente afetada. A densidade de referência obtida por Proctor normal precisa ser revista para o atual cenário de tráfegos agrícolas.

Palavras-chave: Densidade máxima do solo; Conteúdo de água no solo; Textura do solo; Ensaio de Proctor

Abstract

COMPACTION DEGREE OF SOILS WITH CONTRASTING TEXTURES IN SUGARCANE FIELDS

Soil compaction in sugarcane fields is mainly caused by the intensification of heavy machinery traffic. The increase in load applied to the soil and repeatability of passes made mainly in harvesting operations, reduces the physical quality of the soil, affecting productivity and soil functioning. Soil compaction is present in most soils cultivated with sugarcane, and it is aggravated when agricultural operations are carried out with high soil water content. However, in order for soil management to be more assertive, it is essential to correctly diagnose the state of soil compaction, which changes depending on the texture and moisture of the soil. The indicator that best represents the state of compaction is the degree of soil compaction, i.e., the current density of the soil in relation to the maximum density of the soil. Thus, the objectives of this study were: (i) to determine the effect of texture on the soil compaction curve, (ii) to define the critical water content for maximum soil density, (iii) to define the maximum soil density and (iv) to quantify the degree of compaction of soils with contrasting textures, ranging from 0.170 to 0.600 g kg⁻¹ of clay (sandy loam to very clayey) in eight production areas, in the Center-South region of Brazil. At each site, deformed soil samples were collected and subjected to the normal Proctor test (compaction energy of 0.6 MJ m⁻³). In the laboratory, the soil samples were moistened, obtaining a gradient of five water contents. In this way, the normal Proctor density for maximum soil density and critical soil moisture were obtained. Through undisturbed samples collected in the field, the current soil density was calculated. Critical soil water content was higher in clayey soils to reach maximum soil density than in sandy soils. The degree of soil compaction was independent of the clay content of the soil. A degree of compression >100% was found, with amplitudes from 92 to 120%. Soil compaction was present in all soils, with values above the degree of compaction, considered critical for root development. The management of sugarcane cultivation is degrading the physical quality of the soil, regardless of the texture or cycle of the crop. Due to soil compaction, the densities found were higher than the reference densities found by the normal Proctor test, this situation resulted in GC greater than 100%, showing that the increase and intensification of agricultural machinery, the density has been severely affected. The reference density obtained by normal Proctor needs to be revised for the current agricultural traffic scenario.

Keywords: Maximum soil density; Soil water content; Soil Texture; Proctor Test

2.1. Introdução

A compactação do solo é definida como “o processo no qual as partículas do solo são reorganizadas de modo a diminuir o espaço vazio entre elas e colocá-las em contato mais próximo, aumentando-se assim a densidade (SSSA, 2008)”. A extensão das áreas degradadas no mundo pela compactação do solo ainda não é bem conhecida, mas estima-se que mais de 68 milhões de hectares apresentam algum grau de degradação em função desse processo (Batey, 2009). Problemas de compactação do solo têm se intensificado pelo incremento na mecanização empregado nos sistemas agrícolas, os quais experimentam o constante aumento

da massa e potência das máquinas agrícolas (Schjønning et al. 2015; Shah et al., 2017; Keller et al. 2019). Embora a compactação do solo seja uma das formas de degradação mais difundidas em sistemas agrícolas, em algumas culturas com mecanização mais intensa, como é o caso da cana-de-açúcar, estes impactos são ainda mais severos (Cherubin et al., 2016).

A degradação da qualidade física do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar está diretamente associada com a intensificação do tráfego de máquinas na lavoura (Cherubin et al., 2016; Cavalcanti et al., 2020), principalmente durante a colheita, a qual implica na aplicação de cargas que ultrapassam a capacidade de suporte carga dos solos (Souza et al., 2014; Cherubin et al., 2016; Barbosa et al., 2018; Júnnyor et al., 2019). Adicionalmente, considerando que a cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, com ciclo médio de 5 a 6 anos entre o plantio até a renovação do canavial, sendo o processo de colheita realizado linha por linha, a compactação do solo é intensificada pela repetição do tráfego de máquinas ao longo dos ciclos, bem como pela impossibilidade da adoção de práticas de descompactação do solo durante o ciclo médio da cultura (Lozano et al., 2013).

A estagnação da produtividade dos canaviais na última década no Brasil (Otto et al., 2016), uma das possíveis causas está associada a expansão da mecanização agrícola (Barbosa et al., 2018). Portanto, é necessário entender os impactos da mecanização agrícola na estrutura do solo para criar estratégias visando atenuar e controlar o risco de compactação do solo (Duttmann et al., 2014; Mendes et al., 2019). Além do manejo empregado no solo, fatores como a textura, estrutura, teor de matéria orgânica e umidade no momento da operação (Nawaz et al., 2013) devem ser levados em consideração no diagnóstico do estado de compactação no solo.

A umidade do solo é um dos principais fatores para determinar a suscetibilidade à compactação (Silva et al., 2002). Entretanto, métodos laboratoriais, são os mais utilizados para avaliar a suscetibilidade do solo a compactação, sendo importante para estabelecer critérios de compactação no campo. Atualmente a umidade do solo e a densidade do solo são usados para orientar os critérios da compactação em campo através da metodologia do ensaio de Proctor normal (Hu et al., 2022). O ensaio de Proctor normal foi desenvolvido para a engenharia civil (Vargas, 1977), mas tem sido amplamente utilizado e popularizado na mecânica do solo, sendo classificado como método de compactação por impacto, pois aplica um impacto de massa sobre a superfície do solo (Virgil Ping et al., 2002). Através do ensaio de Proctor normal busca-se entender qual o conteúdo de água ideal do solo para se obter a máxima compactação. Isto ocorre através da aplicação de forças de compressão específicas no solo para diferentes conteúdos de água. Portanto, o ensaio de Proctor normal identifica o

grau de compactação do solo e em qual conteúdo de água o solo estará mais suscetível a compactação. No entanto, o ensaio de Proctor normal é influenciado por parâmetros físicos diretos e indiretos do solo, tais como conteúdo de água no solo, teor de argila, densidade e carbono orgânico do solo (Reichert et al., 2018).

De acordo com a Reichert et al. (2018), quando utilizado a mesma energia de compactação, a densidade obtida é dependente do teor de água no solo, pois o incremento desta, aumenta o valor da densidade do solo, até chegar à umidade crítica (onde se observa a máxima densidade do solo) e após decresce, diminuindo a densidade do solo. Entretanto, variáveis como carbono orgânico do solo e teor de argila influenciam os valores de densidade máxima do solo. Braida et al. (2006) observaram que quanto maior o conteúdo de carbono orgânico do solo menor a densidade máxima obtida, e maior o teor de água necessário para obter a umidade crítica de compactação. Isto ocorre devido a menor densidade dos compostos orgânicos e a atuação destes como agente amortecedor dos impactos causados na estrutura do solo, agindo como amortecedor dos impactos causados no solo. Desta forma, a energia aplicada é dissipada e ocorre aumento da retenção de água junto as partículas do solo, que por sua vez atua como um lubrificante e aumenta a coesão entre as partículas do solo.

O teor de argila no solo influencia diretamente nas características de coesão e adesão. A elevada área superficial específica e maior reatividade da fração argila apresenta mais interação com a fase líquida do solo em relação a fração areia. A fração argila apresenta elevada coesão entre as partículas devido a diminuição do efeito lubrificante entre as partículas minerais do solo, assim solos argilosos tem maior suscetibilidade ao processo de compactação que solos arenosos. De acordo com Braida et al. (2006), o aumento do conteúdo de água no solo reduz a sua coesão.

Quando se deseja comparar o estado de compactação de solo com diferentes texturas indica-se utilizar o grau de compactação do solo (GC). O GC se refere a densidade do solo atual a uma densidade máxima obtida ou compactação máxima (Håkansson et al., 1990). O GC é um valor relativo independente da textura do solo (Suzuki et al., 2013), sendo expresso em porcentagem (%). Portanto, trata-se de um indicador importante para caracterizar a compactação em respostas as texturas a diferentes solos, indicando alterações nas propriedades físicas do solo, como na porosidade total do solo em específico na macroporosidade, resistência a penetração e densidade do solo. Globalmente, o desenvolvimento das plantas tem sido correlacionado com o GC. Além disso, muitos estudos apresentam o GC ótimo para o desenvolvimento de plantas e o GC crítico, onde o solo passa a limitar o crescimento radicular e o desenvolvimento das plantas (Håkansson, 1990; Lipiec e

Håkansson, 2000; Silva et al., 2011; Asgarzadeh et al., 2011; Asgarzadeh et al., 2014). Entretanto, as informações sobre GC e seus limites ótimo e crítico em solos cultivados com cana-de-açúcar são escassos. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o grau de compactação em solos cultivados com cana-de-açúcar, usando a densidade máxima obtida pelo ensaio de Proctor como densidade de referência para solos com diferentes teores de argila e ciclos de cultivo da cana-de-açúcar.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Descrição das áreas de estudo

O estudo foi realizado em quatro áreas comerciais com cinco variações texturais, todas localizadas no estado de São Paulo (Fig.1), situado na região Centro-Sul do Brasil. A primeira área está localizada em Marapoama - SP ($21^{\circ}15'33''$ e $49^{\circ}07'44''$ O), de clima tropical – Aw (Köppen e Geiger) e pluviosidade média anual de 1326 mm. A segunda área, situada em Bebedouro - SP ($20^{\circ}56'58''$ S e $48^{\circ}28'45''$ O), de clima tropical semi-úmido – Cfa (Köppen e Geiger) e pluviosidade média anual de 1368 mm. A terceira está localizada em Morro Agudo – SP ($20^{\circ}43'53''$ S e $48^{\circ}03'28''$ O), de clima tropical– Aw (Köppen e Geiger) e pluviosidade média anual de 1433 mm. A quarta área localizada em Limeira – SP ($22^{\circ}33'53''$ S e $47^{\circ}24'06''$ O), de clima tropical de altitude – Cwa (Köppen e Geiger) e pluviosidade média anual de 1576 mm Todos os dados de classificação climática estão de acordo com Alvares et al. (2013).

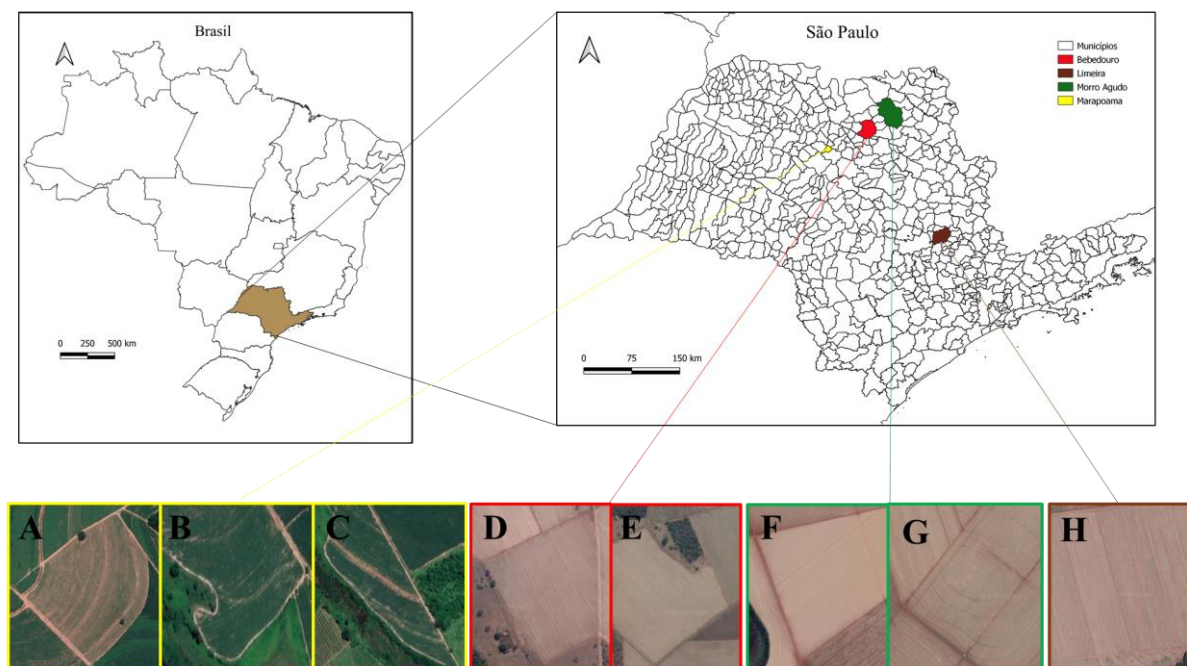


Figura 1. Localização geográfica dos locais de estudos em São Paulo – Brasil.

A granulometria dos solos e teores de carbono (Tabela 1), em Marapoama a classe textural do solo é classificada como três classes de franco arenosa (A, B e C), e todas com ciclo de terceiro ano, em Bebedouro temos duas classes sendo franco argiloso arenoso uma com ciclo de segundo ano (D) e quarto ano (E) sucessivamente, em Limeira uma classe argilo arenosa com ciclo de quarto ano (F), já em Morro Agudo uma classe argiloso (G) e outra com classe muito argiloso (H) ambas de ciclo de terceiro ano.

Tabela 1. Granulometria do solo (argila, silte e areia) e teores de carbono na profundidade de 0-20 cm em oito solos de textura contrastantes em diferentes locais e ciclos de cultivo (Marapoama - A, Marapoama - B, Marapoama - C, Bebedouro - D, Bebedouro - E, Limeira - F, Morro Agudo - G e Morro Agudo - H).

Classes texturais	Coordenadas	ID°	Ciclo	Argila	Silte	Areia	Carbono
				----- kg kg ⁻¹ -----			g kg ⁻¹
Franco Arenoso	21°14'12.5"S 49°08'21.1"O	A	3	0,17	0,04	0,79	7,0
	21°14'03.3"S 49°08'32.4"O	B	3	0,18	0,02	0,80	8,0
	21°13'47.6"S 49°08'32.5"O	C	3	0,20	0,02	0,78	14,0
Franco Argiloso Arenoso	20°50'46.0"S 48°26'13.0"O	D	2	0,22	0,02	0,76	7,0
	20°50'42.0"S 48°25'48.0"O	E	4	0,34	0,08	0,58	7,0
Argilo Arenosa	22°41'24.0"S 47°29'38.0"O	F	4	0,38	0,07	0,55	14,0
Argiloso	20°42'16.7"S 48°18'54.1"O	G	3	0,47	0,09	0,43	14,0
Muito Argiloso	20°41'32.5"S 48°18'29.0"O	H	3	0,60	0,13	0,27	19,0

2.2.2. Curva e grau de compactação

Aproximadamente 20 kg de solo foram coletados nas oito áreas (A, B, C, D, E, F, G e H), na camada de 0-20cm para determinação da densidade máxima de Proctor normal. Os ensaios de Proctor foram realizados de acordo com a metodologia Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1986). Os solos deformados foram peneirados (8 mm) e secos na estufa a 105°C por 48 h para obter conteúdo de água inicial zero. Em seguida os solos foram sucessivamente umedecidos e misturados suavemente, para obter distribuição da uniformidade da água. Os testes foram realizados manualmente através do equipamento de Proctor normal (volume do molde: 942 cm³, diâmetro interno do molde: 105 mm, peso do martelo: 24,5 N, altura de queda: 305 mm, com 25 golpes em cada camada, sendo três

camadas de compactação, com energia de compactação de $0,6 \text{ MJ m}^{-3}$). Após realizado a compactação, foi coletado um anel volumétrico do meio do corpo de prova, e pesado para determinação da densidade máxima do solo ($D_{S_{\text{máx}}}$) em função do teor de água gravimétrico (U). A $D_{S_{\text{máx}}}$ foi extraída como o ponto máximo da relação quadrática entre densidade do solo (D_s) e teor de água gravimétrico do teste de Proctor. O grau de compactação (GC) foi calculado de acordo com Håkansson (1990), a Equação (1):

$$\text{GC (\%)} = \frac{D_s}{D_{S_{\text{máx}}}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

GC = grau de compactação (%)

D_s = densidade do solo atual (Mg m^{-3})

$D_{S_{\text{máx}}}$ = densidade do solo máxima obtida pelo ensaio de Proctor normal (Mg m^{-3})

Os limites críticos do GC foram descritos pelas zonas de compactação, sendo: zona de boa qualidade (zona verde) com valores inferiores a 85%, zona de baixa qualidade (zona amarela) com valores entre 85 a 98 % e zona de baixíssima qualidade (zona vermelha) com valores superiores a 98%. As zonas de compactação foram definidas de acordo com Naderi-Boldaji & Keller et al. (2016).

A análise granulométrica do solo (areia, silte e argila) foi realizada pelo método do densímetro (Gee e Or, 2002). O carbono orgânico do solo foi medido pelo método Walkley-Black (Teixeira et al., 2017).

2.2.3. Densidade do Solo

Em cada local, foram abertas cinco trincheiras na linha de tráfego (aproximadamente $0,40 \times 0,40 \times 0,40 \text{ m}$), consideradas como repetições. As amostras indeformadas de solo foram coletadas usando cilindros metálicos (5 cm de altura e 5 cm de diâmetro – 100 cm^{-3}) que foram lentamente introduzidos no solo, camada por camada, em profundidades de solo de 0–10, 10–20, e 20–40 cm. Assim, os cilindros foram coletados no centro de cada camada (ou seja, 2,5–7,5 cm, 12,5–17,5 cm e 27,5–32,5 cm, respectivamente). Os dados da D_s a campo estão obtidos estão apresentados na Figura 2.

Após os ensaios de Proctor normal, foi realizado a coleta pelo método dos cilindros metálicos no centro do corpo de prova e assim foi determinada da densidade do solo (D_s). A D_s foi calculada a partir do peso do solo seco na estufa a 105° C por 48 h, através da Equação 2. O teor de água gravimétrico (U) foi calculado como a diferença entre peso massa das

amostras do experimento de campo (ou seja, umidade do campo) e aquele após a secagem em estufa.

(2)

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

D_s = densidade do solo atual (Mg m^{-3})

m = massa do solo seco (g).

V = volume do cilindro (cm^3).

A $D_{s_{\text{máx}}}$ foi extraída como o ponto máximo da relação quadrática entre D_s e teor de água gravimétrico do teste de Proctor. Foi realizada análise de regressão para explorar a relação entre umidade crítica de compactação e teor de argila e $D_{s_{\text{máx}}}$ e teor de argila.

Tabela 2. Densidade do solo (Mg m^{-3}) de acordo com a profundidade (cm), para as oito áreas de estudo.

Classes texturais	ID°	Densidade do solo		
		Mg m^{-3}		
		0-10	10-20	20-40
cm				
Franco Arenoso	A	1,69(± 0,05)	1,80(± 0,05)	1,87(± 0,02)
	B	1,81(± 0,05)	1,82(± 0,04)	1,88(± 0,02)
	C	1,76(± 0,01)	1,80(± 0,04)	1,84(± 0,02)
Franco Argiloso Arenoso	D	1,71(± 0,04)	1,73(± 0,02)	1,68(± 0,09)
	E	1,64(± 0,03)	1,71(± 0,07)	1,64(± 0,07)
Argilo arenosa	F	1,82(± 0,07)	1,80(± 0,05)	1,87(± 0,02)
Argiloso	G	1,39(± 0,05)	1,45(± 0,05)	1,42(± 0,05)
Muito Argiloso	H	1,51(± 0,08)	1,59(± 0,01)	1,63(± 0,04)

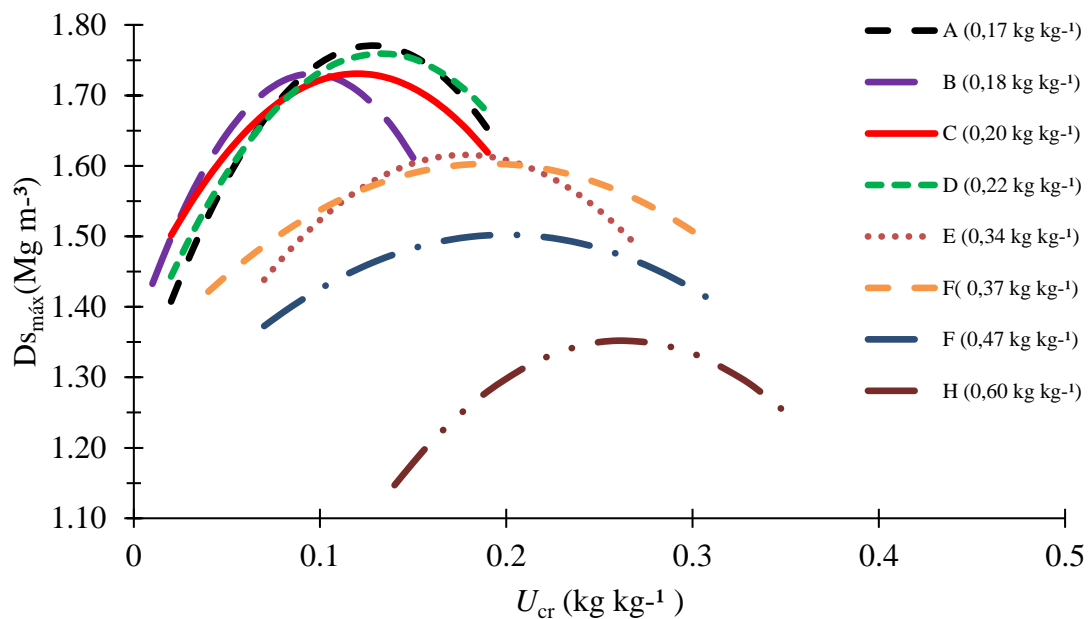
2.3. Resultados

2.3.1. Curva de compactação do solo

A curva de compactação apresentou comportamento quadrático típico, independentemente da textura do solo (Figura 2). A D_s variou entre 1,10 a 1,76 Mg m^{-3} , e o conteúdo de água variou entre 0,02 a 0,38 kg kg^{-1} . Os valores de $D_{s_{\text{máx}}}$ diminuíram de acordo com aumento no teor de argila do solo, assim como, os valores de U_{cr} do solo aumentaram de acordo com o aumento do teor de argila. Foram observados valores de $D_{s_{\text{máx}}}$ de 1,76, 1,73 e 1,73 Mg m^{-3} e U_{cr} de 0,13, 0,10 e 0,12 kg kg^{-1} para solos franco arenoso (A, B e C,

respectivamente), $D_{s_{m\acute{a}x}}$ de 1,76 e 1,61 $Mg\ m^{-3}$ e U_{cr} de 0,13 e 0,18 $kg\ kg^{-1}$ para solos franco argiloso arenoso (D e E, respectivamente), $D_{s_{m\acute{a}x}}$ de 1,58 $Mg\ m^{-3}$ e U_{cr} de 0,17 $kg\ kg^{-1}$ para solo argilo arenosa (F), $D_{s_{m\acute{a}x}}$ de 1,50 $Mg\ m^{-3}$ e U_{cr} de 0,20 $kg\ kg^{-1}$ para solo argiloso (G) e $D_{s_{m\acute{a}x}}$ de 1,35 $Mg\ m^{-3}$ e U_{cr} de 0,26 $kg\ kg^{-1}$ para solo muito argiloso (H).

Observou-se uma relação linear negativa entre a $D_{s_{m\acute{a}x}}$ e U_{cr} dentro do gradiente de incremento do teor de argila do solo (Figura 2). Alem disso, a Figura 3 demonstra correlação positiva ($r^2=0.96$) entre a U_{cr} e variação textural dos solos estudados. Por outro lado, quanto maior o teor de argila menor foi a $D_{s_{m\acute{a}x}}$ em função da variação textural das oito áreas estudadas ($r^2=0.96$) (Figura 4). Portanto, a variação textural do solo alterou a curva de compactação.



A. $y = -31x^2 + 7.95x + 1.2609$	$R^2 = 0.98$	B. $y = -40.5x^2 + 7.756x + 1.3592$	$R^2 = 0.92$	C. $y = -22.9x^2 + 5.5x + 1.4006$	$R^2 = 0.94$
D. $y = -25x^2 + 6.62x + 1.321$	$R^2 = 0.86$	E. $y = -15.2x^2 + 5.41x + 1.1342$	$R^2 = 0.89$	F. $y = -8x^2 + 3.05x + 1.3123$	$R^2 = 0.92$
G. $y = -7.66x^2 + 3.064x + 1.1958$	$R^2 = 0.92$	H. $y = -13.5x^2 + 7.104x + 0.4175$	$R^2 = 1.00$		

Figura 2. Curvas de Proctor normal dos solos de acordo com o teor de argila ($kg\ kg^{-1}$). Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H).

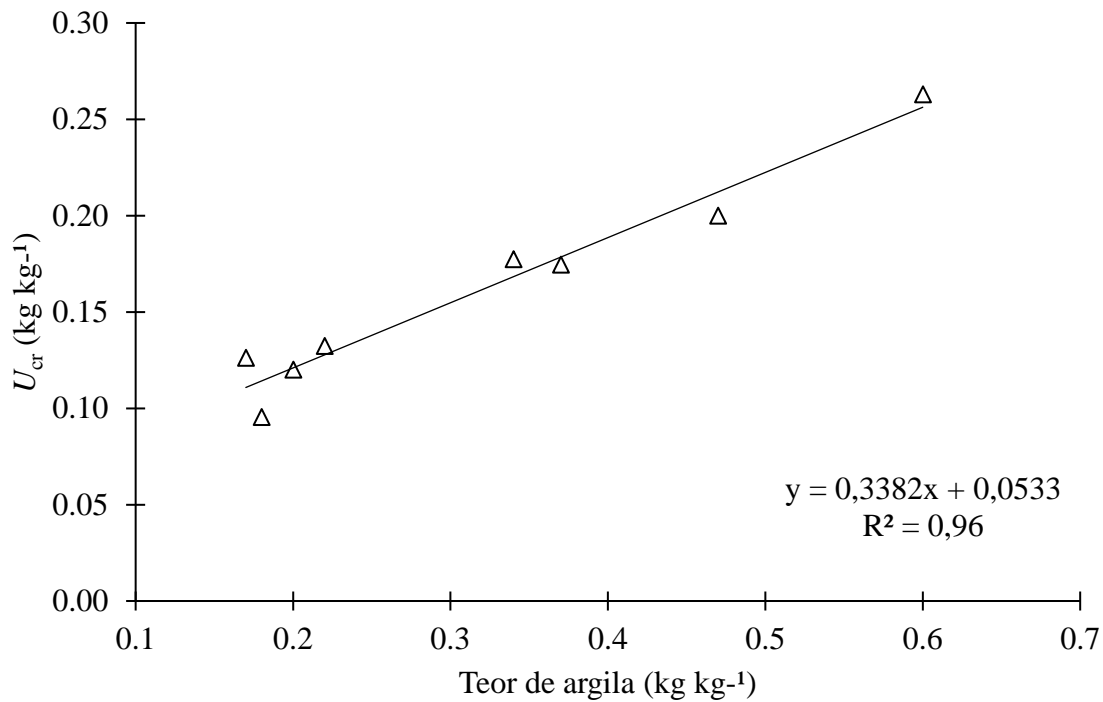


Figura 3. Umidade crítica do solo (U_{cr} (kg kg⁻¹)) pelo ensaio de Proctor em função dos teores de argila (kg kg⁻¹).

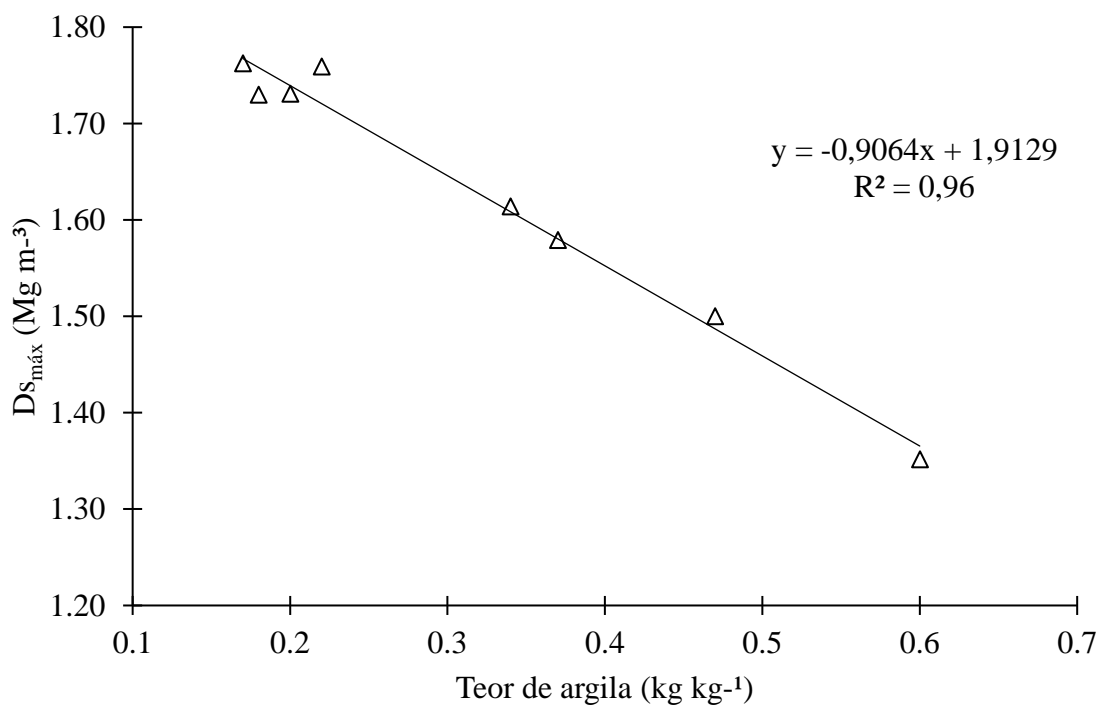


Figura 4. Densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$ (Mg m⁻³)) pelo ensaio de Proctor em função dos teores de argila (kg kg⁻¹).

2.3.2. Grau de compactação do solo

O grau de compactação do solo (GC) é um indicador de compactação do solo, afeta o funcionamento ecológico do solo, como o fluxo ar e água, disponibilidade de nutrientes,

crescimento radicular e conseqüentemente a produtividade das plantas. Na literatura não foi encontrado valores para cana-de-açúcar, então utilizamos o limite do CG crítico (CG_{cr}) para boa qualidade do solo que consiste em valores superiores a 85%, sendo considerado baixa em qualidade do solo (Naderi-Boldaji & Keller et al., 2016), porém, concordando com valores descritos por Håkansson, (1990) e Lipiec e Håkansson, (2000). De acordo com estes autores, o CG_{cr} para crescimento das plantas é 87%, a partir deste valor ocorre reduções drásticas no desenvolvimento das plantas. Portanto, três zonas de compactação foram determinadas (Figuras 5, 6 e 7). Zona de baixíssima qualidade do solo (zona vermelha), zona de baixa qualidade (zona amarela) e boa qualidade do solo (zona verde).

O grau de compactação foi alto para todas as áreas estudadas, com amplitude de 93 a 120% (Figuras 5, 6 e 7). Considerando o gradiente de textura do solo avaliado, os valores de GC não tiveram relação direta com o teor de argila dos solos. Independente do teor de argila, todos os solos são suscetíveis à compactação devido ao estresse aplicado por elevadas cargas e intensidade do uso do maquinário agrícola.

Para a camada 0-10 cm (Figura 5), houve baixa variação dos valores de GC para todos os solos. Observa-se que solos com menores teores de argila tiveram valores de GC menores em relação a maioria dos demais solos. Valores específicos foram observados, por exemplo o menor valor encontrado no solo G (teor de argila de $0,47 \text{ kg kg}^{-1}$) com valor de 92 %, e o maior valor encontrado no solo H (teor de argila de $0,37 \text{ kg kg}^{-1}$), com valor de 120 %. Cabe ressaltar, que independentemente da textura do solo, observou-se acima do GC_{cr} para todos os solos estudados na camada 0-10 cm. Para as camadas de 10-20 e 20-40 cm (Figura 6 e 7, respectivamente), todos os valores foram superiores ao limite crítico do GC assim como na camada de 0-10 cm. O solo G apresentou os menores valores, variando de 97 e 94%, respectivamente para 10-20 e 20-40 cm, e o solo H apresentou os maiores valores variando de 118 a 120 % para 10-20 e 20-40 cm.

Valores de carbono orgânico do solo (COS) variaram de 7,0 a $19,0 \text{ g kg}^{-1}$ apresentados para camada 0-20 cm (Tabela 1), sendo um fator com potencial influência nas curvas de compactação. De acordo com o conjunto de dados, a uma alta compactação no solo, evidenciadas pelos elevados valores de GC_{cr} em toda a variação dos teores de argila. Portanto, em todas as camadas avaliadas o GC esteve acima de 85%, ou seja, dentro da zona de baixa qualidade do solo (zona amarela).

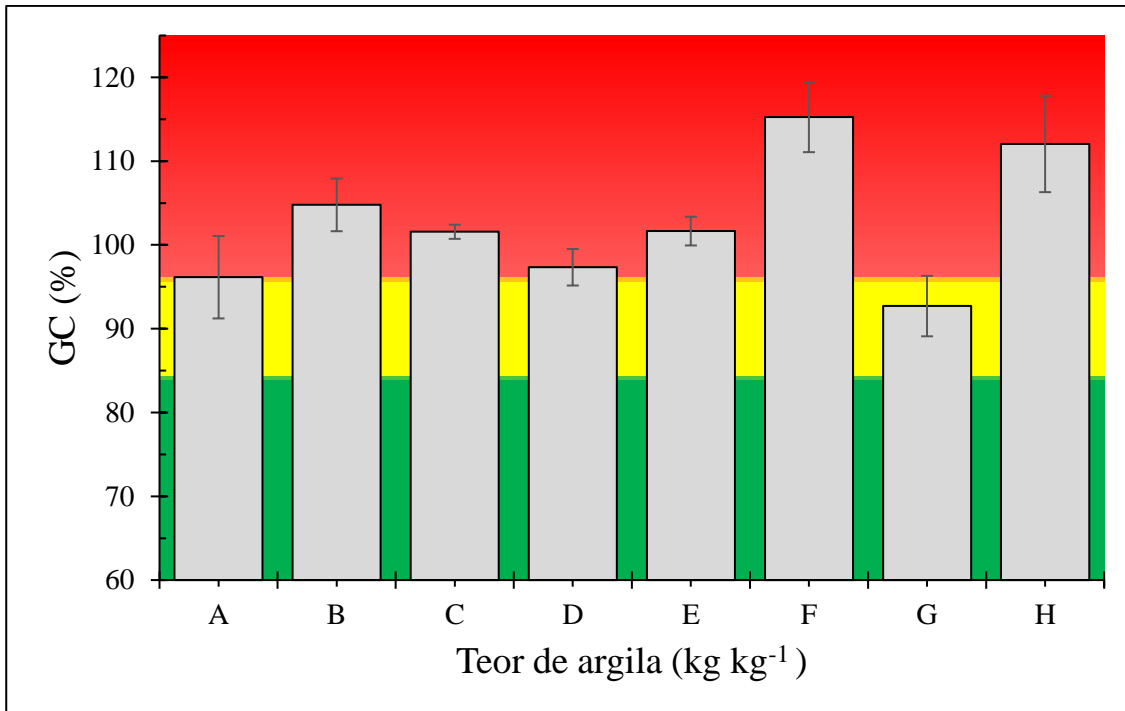


Figura 5. Grau de compactação (GC) para a camada 0-10 cm, de acordo com o teor de argila. Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H). Descrição das zonas de compactação: zona de baixíssima qualidade (zona vermelha) valores superiores a 98%, zona de baixa qualidade (zona amarela) com valores superiores a 85%, zona de boa qualidade (zona verde) valores inferiores a 85%.

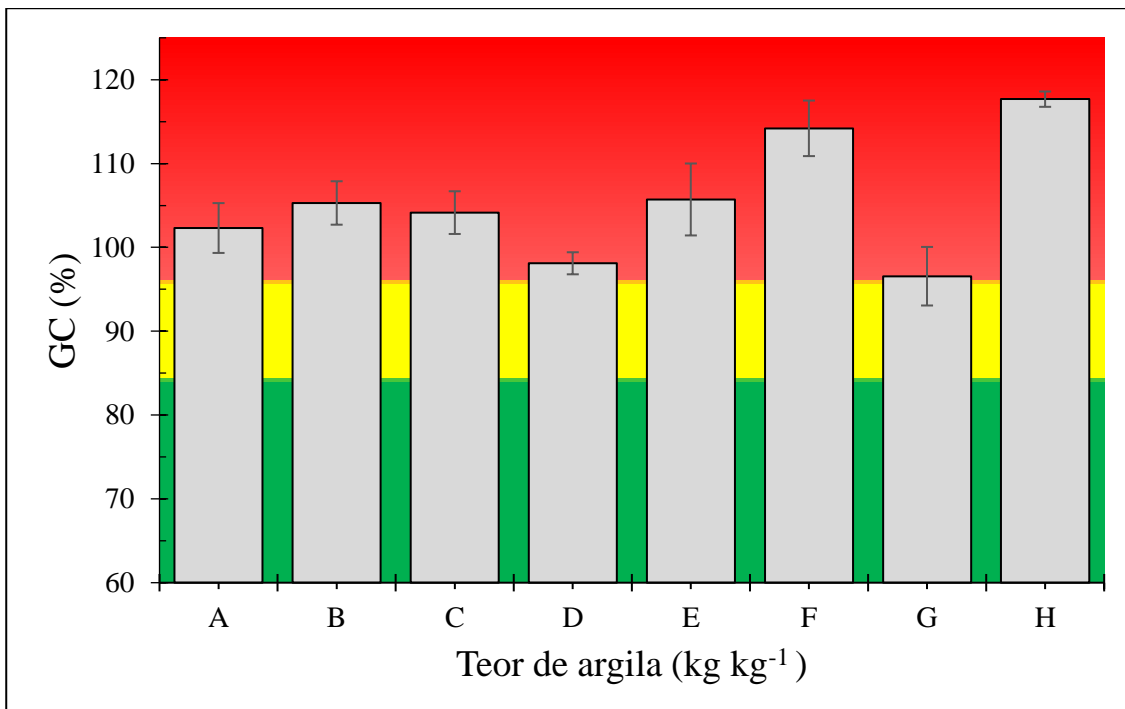


Figura 6. Grau de compactação (GC) para a camada 10-20 cm, de acordo com o teor de argila. Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H). Descrição das zonas de compactação: zona de baixíssima qualidade (zona vermelha) valores superiores a 98%, zona de baixa qualidade (zona amarela) com valores superiores a 85%, zona de boa qualidade (zona verde) valores inferiores a 85%.

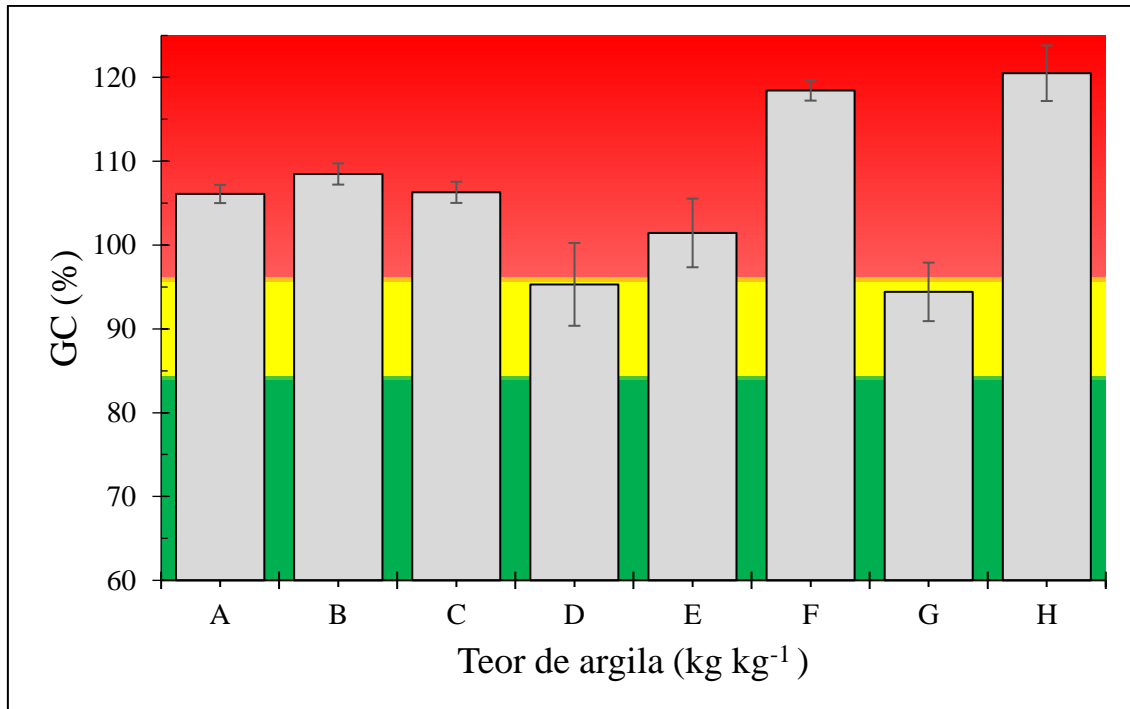


Figura 7. Grau de compactação (GC) para a camada 20-40 cm, de acordo com o teor de argila. Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H). Descrição das zonas de compactação: zona de baixíssima qualidade (zona vermelha) valores superiores a 98%, zona de baixa qualidade (zona amarela) com valores superiores a 85%, zona de boa qualidade (zona verde) valores inferiores a 85%.

2.4. Discussão

2.4.1. Curva de compactação do solo

As curvas de compactação nos solos com diferentes texturas apresentaram bom ajuste ao modelo quadrático (Figura 2) com base na $D_{s_{máx}}$, conforme esperado para o ensaio de Proctor. Para toda variação textural deste estudo podemos ilustrar o efeito compressivo do solo através da curva de compactação (Silva et al., 2002), onde a variação no teor de água alterou a $D_{s_{máx}}$ através de uma mesma força específica aplicada, assim dependendo da textura do solo irá apresentar diferentes curvas de compactação. A diminuição do conteúdo de água no solo, beneficia o incremento do atrito interno entre as partículas de solo, assim, reduz a acomodação e o rearranjo das partículas, elevando a capacidade de suporte do solo e diminuindo a D_s , após uma pressão aplicada sobre o solo (Weirich Neto et al., 2002; Moraes et al., 2017). Entretanto, incremento do conteúdo de água, a partir da U_{cr} , propicia que a água ocupe todos os espaços porosos, e atue como um fluido incompressível, reduzindo assim a $D_{s_{máx}}$. Com o aumento do conteúdo de água, as forças de capilaridade diminuem, assim as partículas se movimentam uma sobre a outra, devido ao efeito da lubrificação, que gera máxima acomodação das partículas e diminuição da resistência ao cisalhamento (de Lima et al., 2020). O conteúdo de água na U_{cr} determina a umidade em que o solo não deve ser

trafegado a fim de evitar que o solo atinja a $D_{s_{m\acute{a}x}}$ e conseqüentemente a máxima compactação (e.g. solo A: $1,76 \text{ Mg cm}^{-3}$). Contudo, as Figuras 2, 3 e 4 demonstram que a variação textural altera a curva de compactação. Este resultado corrobora com estudos realizados por Keller & Håkansson (2010). Além disso, outros fatores como por exemplo teor de matéria orgânica (Braidá et al., 2006), D_s inicial e umidade (Suzuki et al., 2008; Rücknagel et al., 2012) alteram a curva de compactação. A variação no COS (Tabela 1) é outro fator que altera a curva de compactação, principalmente em solos com maior teor de argila, onde interações organo-minerais aumentam a resistência do solo a deformação (Blanco-Canqui et al., 2009) reduzindo a $D_{s_{m\acute{a}x}}$ (Figura 2) e aumentando a U_{cr} (Keller e Håkansson 2010) para a máxima compactação. Por outro lado, solos de textura arenosa são caracterizados por baixos valores de COS em áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Brasil (Tenelli et al., 2021), o que potencializa maiores valores de $D_{s_{m\acute{a}x}}$ como visualizado para os solos A, B, C e D (Tabela 1).

A energia de compactação varia de acordo com o teste de Proctor normal, assim tendo padrões energia de compactação para obter diferentes densidades de Proctor de acordo com o conteúdo de água, portanto este método é caracterizado pela suscetibilidade do solo (Botta et al., 2008, 2009, 2012). Desta forma, a $D_{s_{m\acute{a}x}}$ através do Proctor foi baseada em uma ampla gama de texturas como no estudo de Naderi-Boldaji et al. (2016), sendo recomendada para definir a densidade referência do solo (Keller, 2016). Conseqüentemente, quanto maior a $D_{s_{m\acute{a}x}}$ obtida pelo teste de Proctor, menor será o GC (Håkansson, 1990).

As áreas cultivadas com cana-de-açúcar estudadas apresentaram um gradiente de textura, com variação de 0,17 a 0,60 kg kg^{-1} de argila. De modo geral, solos com teores de argila entre 0,17 a 0,22 kg kg^{-1} apresentaram maiores valores de $D_{s_{m\acute{a}x}}$ comparados aos solos com maiores teores de argila (Figura 4). A $D_{s_{m\acute{a}x}}$ diminui de acordo com o aumento do teor de argila (Imhoff et al., 2016). Este resultado é explicado pela predominância de areia na matriz mineral do solo, a qual é composta predominantemente por quartzo que tem densidade de partículas mais alta que a maioria dos minerais de argila (Brady & Weil, 2002). Além disso, solos arenosos apresentam menor porosidade total que solos argilosos, contribuindo para valores mais altos de D_s e conseqüentemente de $D_{s_{m\acute{a}x}}$, bem como sobre o efeito do atrito de partículas de areia, conforme o aumento das forças de atrito entre as partículas aumentam com a D_s (An et al., 2015), assim tendo baixa retenção de água o que altera a interação do solo com a água. A diferença de valores de $D_{s_{m\acute{a}x}}$ de acordo com a variação textural (Figura 4), são explicados por Meuer et al. (2000). Segundo este autor, solos com maior teor de argila apresenta maior área superficial específica (ASE) e maior capacidade de troca de cátions (CTC), já solos arenosos apresentam ASE e CTC baixa, tornando solos argilosos com maior

capacidade de retenção de água. Com aumento de argila, ocorreu aumento de teores de água para estabelecer a $D_{s_{máx}}$. A água atua como lubrificante entre as partículas do solo, e consequentemente altera a consistência do mesmo, elevando a deformação e alterando a D_s (Suzuki et al., 2013; An et al., 2015). Com o aumento do conteúdo de água a D_s diminui, expressando com $D_{s_{máx}}$ menor para solos argilosos, pois o conteúdo de água otimiza o efeito da argila no solo. Além disso, com o aumento da lubrificação das partículas ocorre redução das forças coesivas do solo (Imhoff et al., 2004). Por outro lado, a maior $D_{s_{máx}}$ nos solos mais arenosos (Figura 2) ocorre devido ao maior estresse pré-consolidação e menor compressão do solo, devido ao aumento nas forças de atrito interno entre as partículas do solo (Severiano et al., 2013), portanto, menos força de coesão (An et al., 2015). Portanto, tanto os componentes minerais quanto orgânicos (Tabela 1) afetam a curva de compactação do solo, e consequentemente cada classe textural do solo terá comportamento diferente frente as práticas de manejo (Reichert et al., 2009; Berisso et al., 2012; Lima et al., 2017) no cultivo de cana-de-açúcar.

2.4.2. Grau de compactação do solo

Para a maioria dos solos, os valores de $D_{s_{máx}}$ para o ensaio de Proctor foram inferiores aos valores de D_s a campo (Tabela 2), gerando valores de GC acima de 100% (Figuras 5-7). Este resultado é possível ser explicado em função da carga empregada pelas máquinas usadas nos canaviais, principalmente colhedoras e transbordos utilizados nas operações de colheita, onde o estresse aplicado sobre a superfície do solo pelo tráfego supera a carga aplicada no ensaio de Proctor. De acordo com Jimenez et al (2021) o estresse aplicado pelo tráfego de máquinas em canaviais varia de 600 a 800 kPa, enquanto Lozano et al. (2013) reportaram que o estresse causado na superfície do solo no processo de colheita e transporte de cana-de-açúcar atinge valores entre 150 a 600 kPa (Lozano et al., 2013). Por outro lado, o estresse empregado no ensaio de Proctor é aproximadamente 560 kPa. Então, suponhamos que a $D_{s_{máx}}$ do solo proposta pelo ensaio de Proctor normal é inferior a $D_{s_{máx}}$ que ocorre a campo, independentemente da textura do solo, necessitando investigações futuras com cargas maiores que as empregadas no ensaio de Proctor normal para definir as densidades máximas do solo, como estudos realizado por Reichert et al.(2009), que sugere que uma carga superiores a 800 kPa é promissora para definir a $D_{s_{máx}}$ para solos em plantio direto

O GC igual ou acima de 100 % chegam no máximo limite de deformação do solo, com redução drástica da porosidade total, principalmente de macroporos que podem atingir valores próximos a zero. Por outro lado, baixo GC resulta em pouco contato ente raiz-solo e

também atua negativamente na produtividade das culturas (Suzuki, 2005; Suzuki et al., 2013). O GC do solo afeta o desenvolvimento das plantas, sendo um bom indicativo para respostas sobre a compactação. Quando o GC excede o limite crítico, ou seja, o alto GC (i.e., zona vermelha) está associado ao elevado estresse mecânico, resultando em aumento na resistência a penetração, redução da capacidade de aeração do solo e conseqüentemente redução do crescimento radicular e potencial produtivo. O GC é um parâmetro integrador eficaz para indicar a qualidade física do solo (Topp et al., 1997).

De acordo com Naderi-Boldaji & Keller et al. (2016) o GC tem sido ligado diretamente ao rendimento agrônômico. Estes autores relacionaram o GC com o índice S, e concluíram que quanto maior o GC do solo pior a qualidade física do solo. De acordo com estes autores, solos com valores de GC até 83,6% são considerados solos de boa qualidade, GC de 83,6 a 97,5 % solos pobres e acima de 97,5% solos com qualidade muito pobre. Outros valores relacionados ao GC ótimo foram encontrados na literatura, como por exemplo 84 % (Carter, 1990), 88 % (Lipiec et al., 1991), 85 a 90 % com valor médio de 87% (Håkansson, 1990; Lipiec e Håkansson, 2000), 74,7 a 87,4 % (Keller et al., 2007), 58,7 a 87,3 % (Reynolds et al., 2009), 85 % (Klein et al., 2009), 91,8 a 94,7 % (Silva et al., 2011), 68,9 a 95,3 % (Asgarzadeh et al, 2011) e 70,3 a 94,9 % (Asgarzadeh et al, 2014). Entretanto, vale ressaltar que nenhum destes estudos foram realizados em solos cultivados com cana-de-açúcar, apenas Toledo et al.(2021), encontrou valores entre 74 a 97% em canaviais para GC para solos argilosos na camada 0-20 cm. Os resultados apresentados nas Figuras 5, 6 e 7 são indicativos que a cana-de-açúcar pode tolerar valores de GC mais elevados que os citados na literatura, entretanto mais estudos são necessários para confirmar tal suposição.

Os resultados deste estudo constataam que independentemente da variação do teor de argila os solos cultivados com cana-de-açúcar são susceptíveis a compactação oriunda do tráfego de máquinas na região Centro-Sul do Brasil. Estes resultados corroboram com outros estudos realizados nesta região, como por exemplo Cherubin et al. (2016), Castioni et al. (2018), Barbosa et al. (2019), Souza et al. (2014) e Esteban et al. (2019). De acordo com estes autores o tráfego pesado associado a descontrolado em áreas de cana-de-açúcar resultam em graves danos na estrutura do solo, favorecendo o aumento no GC do solo. Assim, o estado de compactação pode ser controlado a fim de evitar perdas significativas de produtividade devido ao crescimento inadequado das plantas. Além disso, vários autores mostram perdas nas funções do solo em canaviais (Lima et al. 2015 ,2020; Cherubin et al. 2016, 2021; Cavalcanti et al. 2020; Jimenez et al., 2021), e dos serviços ecossistêmicos (Carvalho et al., 2022). Para atenuar processos de compactação nos canaviais práticas de manejo são

recomendadas como por exemplo adoção de plantio direto e rotação de culturas (Cherubin et al., 2017), zonas livre de tráfego próximo a linha de plantio, tráfego direcionado (Esteban et al., 2019; Barboza et al., 2021), ajuste de bitolas (Barboza et al., 2018) manutenção de palhada no solo (Castioni et al., 2019; Lustosa Carvalho et al., 2021) além do não tráfego quando o solo estiver com umidade próxima a U_{cr} .

2.5. Conclusão

A densidade máxima do solo foi maior em solos de baixos teores de argila. Solos arenosos tiveram maiores valores de densidade máxima do solo, com valores de conteúdo de água menores. Enquanto solos argilosos foi necessário um maior conteúdo de água ideal para se obter a densidade máxima do solo.

A compactação está presente em todos os solos estudados, o GC foi independente ao teor de argila, com valores de GC acima do limite considerado crítico para o crescimento radicular. Desta forma, conclui-se que o manejo do cultivo de cana-de-açúcar está degradando a qualidade física do solo, independentemente da textura do solo ou ciclo da cultura.

O ensaio de Proctor normal não foi eficiente para definir $D_{s_{máx}}$ do solo, pois, os valores encontrados no campo foram superiores aos definidos pelo ensaio de Proctor normal. Os valores de D_s encontrados na campo ultrapassaram os valores de $D_{s_{máx}}$ encontrados pelo ensaio de Proctor, mostrando que as cargas aplicadas pelas atuais máquinas utilizadas nas operações agrícolas em cana-de-açúcar ultrapassam a energia de compactação do ensaio de Proctor normal. Deve-se realizar uma revisão de densidade referência obtida por ensaio de Proctor para os atuais cenários de tráfego de máquinas agrícolas.

Referências

- An, J., Zhang, Y., & Yu, N. (2015). Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. *Soil and Tillage Research*, 145, 216-223.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Dexter, A. R., Mahboubi, A. A., & Neyshabouri, M. R. (2014). Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*, 226, 8-20.

- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A., & Dexter, A. R. (2011). Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, 166(1), 34-42.
- Barbosa, L. C., Magalhães, P. S. G., Bordonal, R. O., Cherubin, M. R., Castioni, G. A. F., Tenelli, S., ... & Carvalho, J. L. N. (2019). Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. *Soil and Tillage Research*, 195, 104383.
- Barbosa, L.C., Souza, Z.M.D., Franco, H.C.J., Otto, R., Rossi Neto, J., Garside, A.L., Carvalho, J.L.N., 2018. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional* 13, 15–25. doi:10.1016/j.geodrs.2018.03.002.
- Barbosa, L. C., Magalhães, P. S. G., Bordonal, R. O., Cherubin, M. R., Castioni, G. A., Rossi Neto, J., ... & Carvalho, J. L. N. (2021). Untrafficked furrowed seedbed sustains soil physical quality in sugarcane mechanized fields. *European Journal of Soil Science*, 72(5), 2150-2164.
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management—a review. *Soil use and management*, 25(4), 335-345.
- Berisso, F. E., Schjønning, P., Keller, T., Lamandé, M., Etana, A., De Jonge, L. W., ... & Forkman, J. (2012). Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil and Tillage Research*, 122, 42-51.
- Blanco-Canqui, H., Stone, L. R., Schlegel, A. J., Lyon, D. J., Vigil, M. F., Mikha, M. M., ... & Rice, C. W. (2009). No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 73(6), 1871-1879.
- Botta, G. F., Becerra, A. T., & Tourn, F. B. (2009). Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 381-386.
- Botta, G. F., Rivero, D., Tourn, M., Melcon, F. B., Pozzolo, O., Nardon, G., ... & Stadler, S. (2008). Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. *Soil and Tillage Research*, 101(1-2), 44-51.
- Botta, G. F., Vázquez, J. M., Becerra, A. T., Balbuena, R., & Stadler, S. (2012). Soil compaction distribution under land clearing in calden (*Prosopis Caldenia* Burkart) forest in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research*, 119, 70-75.

- Braida, J. A., Reichert, J. M., Veiga, M. D., & Reinert, D. J. (2006). Mulch and soil organic carbon content and their relationship with the maximum soil density obtained in the proctor test. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30, 605-614.
- Carter, M. R. (1990). Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, 70(3), 425-433.
- Castioni, G. A., Cherubin, M. R., Menandro, L. M. S., Sanches, G. M., de Oliveira Bordonal, R., Barbosa, L. C., ... & Carvalho, J. L. N. (2018). Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. *Soil and Tillage Research*, 184, 301-309.
- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M., & Cherubin, M. R. (2020). Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. *Geoderma*, 370, 114353.
- Cherubin, M. R., Bordonal, R. O., Castioni, G. A., Guimaraes, E. M., Lisboa, I. P., Moraes, L. A., ... & Carvalho, J. L. (2021). Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops and Products*, 163, 113315.
- Cherubin, M. R., Franco, A. L., Guimarães, R. M., Tormena, C. A., Cerri, C. E., Karlen, D. L., & Cerri, C. C. (2017). Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). *Soil and Tillage Research*, 173, 64-74.
- Cherubin, M. R., Oliveira, D. M. D. S., Feigl, B. J., Pimentel, L. G., Lisboa, I. P., Gmach, M. R., ... & Cerri, C. C. (2018). Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. *Scientia Agricola*, 75, 255-272.
- Cherubin, M.R., Chavarro-Bermeo, J.P., Silva-Olaya, A.M., 2019. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agroforestry Systems* 93, 1741–1753. doi:10.1007/s10457-018-0282-y.
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franco, A. L., Tormena, C. A., Cerri, C. E., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, 267, 156-168.
- Colombi, T., Braun, S., Keller, T., & Walter, A. (2017). Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. *Science of the Total Environment*, 574, 1283-1293.
- Da Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(6), 1775-1781.

- de Lima, R. P., da Silva, A. P., Giarola, N. F., da Silva, A. R., & Rolim, M. M. (2017). Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems engineering*, 162, 1-10.
- de Lima, R. P., Rolim, M. M., da Silva, A. R., de Oliveira, V. S., Pedrosa, E. M. R., & Tavares, U. E. (2016). Simple models for predicting agricultural trafficability on cohesive soils cultivated with sugarcane in Brazil. *Sugar Tech*, 18(4), 347-353.
- de Lima, R. P., Rolim, M. M., C Dantas, D. D., da Silva, A. R., & Mendonça, E. A. (2021). Compressive properties and least limiting water range of plough layer and plough pan in sugarcane fields. *Soil Use and Management*, 37(3), 533-544.
- de Lima, R. P., Rolim, M. M., Toledo, M. P., Tormena, C. A., da Silva, A. R., e Silva, I. A. C., & Pedrosa, E. M. (2022). Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 215, 105215.
- Duttmann, R., Schwanebeck, M., Nolde, M., & Horn, R. (2014). Predicting soil compaction risks related to field traffic during silage maize harvest. *Soil Science Society of America Journal*, 78(2), 408-421.
- Esteban, D. A. A., de Souza, Z. M., Tormena, C. A., Lovera, L. H., de Souza Lima, E., de Oliveira, I. N., & de Paula Ribeiro, N. (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil and Tillage Research*, 187, 60-71.
- Håkansson, I. (1990). A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and tillage research*, 16(1-2), 105-120.
- Håkansson, I., & Lipiec, J. (2000). A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53(2), 71-85.
- Hu, W., Polaczyk, P., Gong, H., Ma, Y., & Huang, B. (2022). Visualization and quantification of soil laboratory impact compaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2), 616-624.
- Imhoff, S., Da Silva, A. P., & Fallow, D. (2004). Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, 68(1), 17-24.
- Imhoff, S., Pires da Silva, A., Ghiberto, P. J., Tormena, C. A., Pilatti, M. A., & Libardi, P. L. (2016). Physical quality indicators and mechanical behavior of agricultural soils of Argentina. *PLoS One*, 11(4), e0153827.

- Jimenez, K. J., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Cavalcanti, R. Q., Silva, Ê. F., & Pedrosa, E. M. (2021). Soil Physical Indicators of a Sugarcane Field Subjected to Successive Mechanised Harvests. *Sugar Tech*, 23(4), 811-818.
- Jimenez, K. J., Rolim, M. M., Gomes, I. F., de Lima, R. P., Berrio, L. L. A., & Ortiz, P. F. (2021). Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, 206, 104847.
- Júnnyor, W. D. S. G., Diserens, E., De Maria, I. C., Araujo-Junior, C. F., Farhate, C. V. V., & de Souza, Z. M. (2019). Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Science of the total environment*, 681, 424-434.
- Keller, T., & Håkansson, I. (2010). Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, 154(3-4), 398-406.
- Keller, T., Arvidsson, J., & Dexter, A. R. (2007). Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2), 45-52.
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Manalili, M. P., Rek, J., Stadelmann, V., ... & Or, D. (2017). Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure. *Vadose Zone Journal*, 16(4), 1-16.
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Schymanski, S. J., Weisskopf, P., Koestel, J., ... & Or, D. (2021). Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 85(4), 1002-1020.
- Keller, T., Lamandé, M., Schjønning, P., & Dexter, A. R. (2011). Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, 163(1-2), 13-23.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194, 104293.
- Klein, V. A., Baseggio, M., & Madalosso, T. (2009). Physical quality indicators in Latosol under no tillage chiseled/Indicadores da qualidade física de um Latossolo vermelho distrofico tipico sob plantio direto escarificado. *Ciência Rural*, 39(9), 2475-2482.
- Lozano, N., Rolim, M. M., Oliveira, V. S., Peixoto, U. E., & Pedrosa, E. M. R. (2013). Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, 129, 61-68.

- Lustosa Carvalho, M., Bonini da Luz, F., de Lima, R. P., Cavalieri-Polizeli, K. M. V., Carvalho, J. L. N., & Cherubin, M. R. (2022). Assessment of Soil Physical Quality and Water Flow Regulation under Straw Removal Management in Sugarcane Production Fields. *Sustainability*, 14(2), 841.
- Mendes, P., Rolim, M. M., Lima, R. P. D., Pedrosa, E. M., Tavares, U. E., & Simões, D. E. (2019). Estimation of precompression stress in an Ultisol cultivated with sugarcane. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 336-340.
- Meuer, E.J.; RHENHEIMER, D. & BISSANI, C. Fenômenos de superfície. In: MEURER, E.J., ed. *Fundamentos de química do solo*. Porto Alegre, Genesis, 2000. 174p.
- Moraes, M.T., Debiassi, R., Carlesso, Franchini, J.C., Silva, V.R., Luz, F.B., 2017. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. *Soil Till. Res.* 170, 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.03.002>.
- Naderi-Boldaji, M., Weiskopf, P., Stettler, M., & Keller, T. (2016). Predicting the relative density from on-the-go horizontal penetrometer measurements at some arable top soils in Northern Switzerland. *Soil and Tillage Research*, 159, 23-32.
- Nawaz, M. F., Bourrie, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for sustainable development*, 33(2), 291-309.
- Otto, R., Castro, S. A. Q., Mariano, E., Castro, S. G. Q., Franco, H. C. J., & Trivelin, P. C. O. (2016). Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next? *Bioenergy Research*, 9(4), 1272-1289.
- Reichert, J. M., Mentges, M. I., Rodrigues, M. F., Cavalli, J. P., Awe, G. O., & Mentges, L. R. (2018). Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. *Catena*, 165, 345-357.
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102(2), 242-254.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263.
- Rücknagel, J., Christen, O., Hofmann, B., & Ulrich, S. (2012). A simple model to estimate change in precompression stress as a function of water content on the basis of precompression stress at field capacity. *Geoderma*, 177, 1-7.

- Schjønning, P., Stettler, M., Keller, T., Lassen, P., & Lamandé, M. (2015). Predicted tyre–soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil and Tillage Research*, 152, 52-66.
- Schjønning, P., van den Akker, J. J. H., Keller, T., Greve, M. H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J., & Breuning-Madsen, H. (2015). Driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction: A European perspective. *Advances in Agronomy*, 133, 183– 237.
- Severiano, E. D. C., de Oliveira, G. C., Dias Junior, M. D. S., Curi, N., de Pinho Costa, K. A., & Carducci, C. E. (2013). Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado, *Soil Res.*, 51, 193–202.
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., ... & Souliyanonh, B. (2017). Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 10056-10067.
- Shaukat, H., Flower, K. C., & Leopold, M. (2022). Quasi-3D mapping of soil moisture in agricultural fields using electrical conductivity sensing. *Agricultural Water Management*, 259, 107246.
- Silva, G. L., Lima, H. V., Campanha, M. M., Gilkes, R. J., & Oliveira, T. S. (2011). Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167, 61-70.
- Silva, V. R., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Soares, J. M. (2002). Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I-Estado inicial de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26(1), 1-8.
- Soil Science Glossary Terms Committee, & Soil Science Society of America. (2008). *Glossary of soil science terms 2008*. ASA-CSSA-SSSA.
- Souza, G. S. D., Souza, Z. M. D., Silva, R. B. D., Barbosa, R. S., & Araújo, F. S. (2014). Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(1), 135-146.
- Suzuki, L. E. A. S., Reichert, J. M., & Reinert, D. J. (2013). Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. *Soil research*, 51(4), 311-321.
- Suzuki, L. E. A. S., Reichert, J. M., Reinert, D. J., & de Lima, C. L. R. (2015). Degree of compactness and mechanical properties of a subtropical Alfisol with eucalyptus, native forest, and grazed pasture. *Forest Science*, 61(4), 716-722.

- Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Lima, C. L. R. D. (2008). Estimating soil susceptibility to compaction and load support capacity based on physical parameters of soils from Rio Grande do Sul state. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 963-973.
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise de solo.
- Tenelli, S., Otto, R., Bordonal, R. O., & Carvalho, J. L. N. (2021). How do nitrogen fertilization and cover crop influence soil CN stocks and subsequent yields of sugarcane?. *Soil and Tillage Research*, 211, 104999.
- Toledo, M. P., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Cavalcanti, R. Q., Ortiz, P. F., & Cherubin, M. R. (2021). Strength, swelling and compressibility of unsaturated sugarcane soils. *Soil and Tillage Research*, 212, 105072.
- Topp, E., & Pattey, E. (1997). Soils as sources and sinks for atmospheric methane. *Canadian journal of soil science*, 77(2), 167-177.
- Vargas, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.
- Weirich Neto, P. H.; Rosa, A. L. T. da; Gomes, J. A. Suscetibilidade de dois tipos de solo à compactação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.349-353, 2002.

3. SENSOR DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS DE CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

A compactação do solo é uma das principais causas da degradação física do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Brasil. Normalmente, o diagnóstico da compactação do solo é realizado por métodos “tradicionais”, que na maioria das vezes exige trabalho manual, número elevado de amostras e são demorados. No entanto, o cultivo de cana-de-açúcar no Brasil é caracterizado pela produção em grandes áreas o que torna o diagnóstico da compactação do solo muitas vezes ineficiente. Desta forma métodos alternativos aos tradicionais, rápidos, não invasivos, e que permitam o diagnóstico da compactação do solo em larga escala emergem no setor canavieiro. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi diagnosticar a compactação do solo usando a condutividade elétrica aparente (CEa) obtida por sensor de indução eletromagnética em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. O estudo foi realizado em oito áreas comerciais de cana-de-açúcar localizadas em quatro municípios na região Centro-Sul do Brasil. Este conjunto de áreas permitiu compor um banco de dados com um gradiente de textura do solo, variando de franco arenoso a muito argiloso. Em cada área foi realizado o mapeamento de CEa, para definição de três regiões distintas de compactação, e posteriormente foi realizada coleta de solo para avaliação de indicadores tradicionais em laboratório (e.g., densidade do solo, porosidade total, resistência a penetração) e a campo (avaliação visual da estrutura do solo, resistência a penetração) em cada região a fim de compreender a relação entre indicadores tradicionais e condutividade elétrica aparente do solo para identificar de forma precisa e eficaz regiões de compactação do solo. Os resultados revelaram que as regiões contrastantes discriminadas pelo sensor eletromagnético com base na CEa do solo não apresentaram variações no estado de compactação do solo. Isso se conformou com o uso dos atributos tradicionais de física do solo, onde todas áreas avaliadas apresentaram elevado grau de compactação (acima dos limites críticos para o solo). Conclui-se que novos estudos sob estados de compactação do solo contrastantes em ambiente controlado devem ser realizados, bem como estudar fatores adicionais que alteram a CEa para validar nossos achados.

Palavras-chave: Qualidade física do solo; Textura do solo; Parâmetros físicos do solo

Abstract

ELECTROMAGNETIC INDUCTION SENSOR IN THE IDENTIFICATION OF SOIL COMPACTION IN SUGARCANE GROWING AREAS

Soil compaction is one of the main causes of physical soil degradation in areas cultivated with sugarcane in Brazil. Normally, the diagnosis of soil compaction is carried out by “traditional” methods, which in most cases require manual work, a large number of samples and are time-consuming. However, sugarcane cultivation in Brazil is characterized by

production in large areas, which makes the diagnosis of soil compaction often inefficient. In this way, alternative methods to the traditional ones, fast, non-invasive, and that allow the diagnosis of soil compaction on a large scale emerge in the sugarcane sector. In this context, the objective of this work was to diagnose soil compaction using the apparent electrical conductivity (ECa) obtained by an electromagnetic induction sensor in areas cultivated with sugarcane. The study was carried out in eight commercial sugarcane areas located in four municipalities in the Center-South region of Brazil. This set of areas made it possible to compose a database with a soil texture gradient, ranging from sandy loam to very clayey. In each area, CEa mapping was carried out, to define three distinct regions of compaction, and then soil collection was carried out to evaluate traditional indicators in the laboratory (e.g., soil density, total porosity, penetration resistance) and in the field. (visual assessment of soil structure, penetration resistance) in each region in order to understand the relationship between traditional indicators and soil apparent electrical conductivity to accurately and effectively identify regions of soil compaction. The results revealed that the contrasting regions discriminated by the electromagnetic sensor based on the ECa of the soil did not show variations in the state of soil compaction. This was in line with the use of traditional soil physics attributes, where all areas evaluated showed a high degree of compaction (above the critical limits for the soil). It is concluded that further studies under contrasting soil compaction states in a controlled environment should be carried out, as well as studying additional factors that alter ECa to validate our findings.

Keywords: Soil physical quality; Soil texture; Physical parameters of the soil

3.1. Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo responsável pela produção de 40% da produção mundial (FAO, 2020). Entretanto na última década ocorreu uma estagnação na produção no Brasil (Otto et al., 2016), onde a compactação do solo tem sido considerada um dos principais fatores desta estagnação (Cherubin et al., 2016; Lima et al., 2017). A compactação é decorrente principalmente da substituição de operações manuais pela utilização de máquinas agrícolas (Lozano et al., 2013), que podem aplicar pressões no solo entre 600 a 800 kPa (Jimenez et al., 2021), valor superior a capacidade de suporte de carga da maioria dos solos. Além disso, o tráfego descontrolado quando induzido na linha de cultivo prejudica a soqueira e as futuras brotações, reduzindo a longevidade do canavial (Souza et al., 2014; Barbosa et al., 2019) e consequentemente a produtividade de cana-de-açúcar (De Souza et al., 2014; Cherubin et al., 2016; Júnnyor et al., 2019). Portanto, a compactação do solo é uma ameaça a sustentabilidade e rentabilidade no setor canavieiro (Moraes et al., 2018), e o seu diagnóstico correto é imprescindível para ter condições de fazer manejos assertivos, visando otimizar recursos financeiros e reduzir os impactos ambientais.

A compactação do solo está diretamente associada a perda de qualidade física do solo (De Souza et al., 2014, Júnnyor et al., 2019; Bluett et al., 2019), impactando as funções e

processos do solo (Cherubin et al., 2016; Longepierre et al., 2021). Solos compactados tem sua estrutura degradada (Keller et al., 2019; Peixoto et al., 2019) através do aumento da densidade (Hamza e Anderson, 2005; Sithole et al., 2016), aumento na resistência a penetração do solo (Marasca et al., 2016; De Moraes et al., 2018), conseqüentemente, diminuindo a porosidade total do solo (Oliveira et al., 2010; Rossetti e Centurion, 2013). Assim, há uma redução da difusão de gases no solo, infiltração de água, condutividade hidráulica (Chen et al., 2014; Cavalcanti et al., 2019, 2020; Horn et al., 2019), e conseqüentemente impacta negativamente no desenvolvimento radicular e produtividade da cana-de-açúcar (Carvalho et al., 2017; Barbosa et al., 2018; Esteban et al., 2019).

O diagnóstico da compactação do solo tem sido realizado através da avaliação de indicadores físicos do solo em laboratório e a campo. Indicadores como densidade do solo, porosidade do solo, aeração do solo, retenção, armazenamento e condutividade de água, resistência a penetração e estabilidade de agregados são tradicionalmente utilizados para realizar a avaliação da qualidade física do solo a nível de laboratório (Cherubin et al., 2016; Bünemann et al., 2018; Simon et al., 2022). Por outro lado, a Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) (Ball et al., 2007; Guimarães et al., 2011) e a resistência a penetração são frequentemente mais utilizados a nível de campo. Outra alternativa de campo refere-se aos métodos visuais de avaliação do solo, como o VESS tem sido utilizado para diagnosticar degradação física do solo em diferentes cenários de usos e manejos (Franco et al., 2019). Em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, esse método possibilita relacionar o diagnóstico da estrutura a campo com os valores obtidos por métodos tradicionais de laboratório (e.g., densidade, umidade, resistência do solo a penetração, macroporosidade, agregação do solo, condutividade elétrica), sendo considerado um indicador de baixo custo (Cherubin et al., 2017; Castioni et al., 2018). A resistência a penetração do solo é o método mais utilizado para diagnosticar a compactação do solo no campo (Beckett et al., 2018). No entanto, métodos tradicionais geralmente são demorados e caros, impondo dificuldades para sua adoção em larga escala no campo. Além disso, a resistência a penetração é influenciada pela umidade do solo o que torna complexo o diagnóstico da compactação através deste método (Vaz et al., 2011). Desta forma, busca-se metodologias alternativas e preferencialmente automatizadas para diagnosticar a compactação do solo e atender à crescente demanda de produtores e consultores.

Neste contexto, emerge a utilização de métodos geofísicos, através de sensores de indução eletromagnética (EMI). Esta metodologia tem apresentado potencial para examinar a estrutura do solo (Romero-Ruiz et al., 2018, 2022; Blanchy et al., 2019) e eventualmente pode

ser uma alternativa para diagnosticar a compactação do solo. Uma destas técnicas de sensoriamento proximal de indução eletromagnética que vem sendo utilizada é a condutividade elétrica aparente (CEa) (Kühn et al., 2009). Propriedades elétricas são sensíveis a estrutura do solo e seu arranjo espacial (Day-Lewis et al., 2017) sendo extensivamente usados para quantificar o teor de água em solos (Doolittle & Brevik, 2014), textura do solo (Kühn et al., 2009) e em alguns casos processos de compactação do solo (Besson et al., 2013). Através da CEa é possível determinar de forma indireta as variações das propriedades físicas e químicas do solo (Push et al., 2021), com sensores que atuam de forma não invasiva, de fácil portabilidade de aplicações e eficiência para descrever a variabilidade espacial do solo (Reedy & Scanlon, 2003; Sudduth et al., 2004), possibilitando a aquisição de um grande volume de dados que colaboram para criação de zonas de manejo e contribuem na tomada de decisão. De acordo com Romero-Ruiz et al. (2021), a CEa é um novo modelo pedofísico explicando o arranjo dos constituintes do solo, na matriz do solo e nos macroporos do solo. Além disso, a CEa demonstra grande potencial como ferramenta para determinação de diferentes potenciais de produtividade e fertilidade do solo (Sudduth et al., 2005) e regiões de gestão (Molin & Castro, 2008). Sob ponto de vista físico do solo, estudos mostraram correlação entre a CEa com resistência a penetração do solo (Galambošová et al., 2020) e macroporosidade (Moysey e Liu, 2012). Por outro lado, Besson et al. (2013) caracterizaram a compactação do solo (usando a densidade do solo como indicador) por meio da resistividade elétrica do solo (inverso de condutividade elétrica), um potencial para indicar a compactação no solo (Seladji et al., 2010).

Perante o histórico de tecnologias acessíveis e de alta qualidade na coleta de dados para manejar a variabilidade espacial das lavouras, a CEa do solo tem demonstrado eficiência pois possui uma rápida coleta de dados, alta resolução e baixo custo, sendo avaliada para condições gerais de fertilidade do solo (Sudduth et al., 2005).

A CEa do solo está associada as propriedades dos padrões espaciais do solo, úteis e fáceis de serem obtidas. No entanto, para melhor interpretação do conjunto de dados (Corwin e Lesch, 2003), é necessária uma grande grade amostral para obtenção de dados no campo (Parda-Igúzquiza e Dowd, 2013), com um pré-tratamento de dados para gerar mapas confiáveis e otimizar as amostragens de solo (Sanches et al., 2019). Desta forma, regiões de manejo são delimitadas (Betzek et al., 2019, Pentos et al., 2021) com base na composição mineral do solo, estrutura do solo, conteúdo de água e temperatura (Day-Lewis et al., 2017).

A literatura sobre CEa para mapeamento de solo é vasta, entretanto ainda muito pouco empregada para avaliação do diagnóstico da compactação do solo (Sanches et al.,

2019), particularmente em áreas de cana-de-açúcar. Uma das poucas (se não a única) evidência de correlação da CEa com parâmetros físicos do solo foi reportada por Castioni et al. (2018) em um solo argiloso cultivado com cana-de-açúcar em Iracemápolis/SP. Neste estudo, os autores verificaram que menores valores de CEa foram relacionados com solos mais compactados e fisicamente degradados. Entretanto, embora promissor, esse estudo pontual necessita ser replicado em diferentes classes de solo para que se obtenha resultados mais conclusivos para solos cultivados com cana-de-açúcar.

No atual cenário da expansão da cana-de-açúcar com colheita mecanizada e com utilização de máquinas cada vez mais pesadas (Keller et al.,2022), as condições físicas do solo devem ser monitoradas, visando minimizar os impactos na estrutura do solo. A hipótese deste estudo é que a CEa do solo medida através do EMI pode ser um potencial ferramenta para mapeamento em larga escala da compactação do solo, visando a otimização de recursos financeiros e ambientais. O objetivo é diagnosticar a compactação do solo usando condutividade elétrica aparente obtida por sensor de indução eletromagnética em áreas de cana-de-açúcar, e discriminar por regiões de compactação contrastantes do solo.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Descrição das áreas de estudo

O estudo foi realizado nas mesmas oito áreas cultivadas com cana-de-açúcar com os seguintes conteúdos de argila: classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H), já descritas na tabela 1 do item 2.1.1 do Capítulo 1 desta dissertação.

3.2.2. Metodologia para mapeamento da CEa

Todas as áreas foram previamente mapeadas com o sensor de indução eletromagnética TSM (Top Soil Mapper, Geoprospector GmbH, Baden, Áustria), medindo a CEa (Figura 1) simultaneamente em quatro profundidades diferentes, o sensor fica acoplado em um veículo, com a frequência de leitura de 5 Hz com espaçamento de 5 metros entre passadas do sensor, este mapeamento é inicializado e finalizado no mesmo dia. Após aquisição dos dados realizou-se o processamento para determinação de pontos de checagem de compactação do solo através da plataforma “Smart Sampling” da CROPMAN – Inteligência em Diagnóstico de Solos, para identificação dos pontos de checagem através do mapa da grade amostral de solo com amostras direcionadas (Figura 2), e de validação das regiões de compactação do solo

(Figura 3). No presente estudo, os dados de ECa foram avaliados principalmente para fins qualitativos, onde apenas as diferenças relativas na ECa foram de interesse, através do mapeamento de CEa, para definição de três regiões distintas de compactação, as regiões sendo apresentadas (Tabela 1), com a camada compactada (cm) e 5 repetições fornecidas. Sendo a região 1 (RG1) definida como a compactação localizada na área superficial, e região 2 (RG2), definida na camada subsuperficial e na região 3 (RG) na camada mais profunda. Todos os dados do sensor Top Soil Mapper (TSM), além dos mapas gerados na pesquisa foram fornecidos pela empresa CROPMAN.

Tabela 1. Leituras de CEa das camadas de máxima compactação determinadas sensor de indução eletromagnética TSM nas áreas (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)).

Cenários		A	B	C	D	E	F	G	H
Regiões	Repetição	Camada de Máxima Compactação							
		cm							
RG1	1	11	15	10	15	15	15	19	13
RG1	2	15	14	11	11	14	17	19	12
RG1	3	12	5	11	10	14	17	20	11
RG1	4	10	6	8	13	5	18	20	15
RG1	5	8	12	15	13	14	20	21	12
RG2	1	35	33	25	26	38	23	23	27
RG2	2	32	39	32	29	30	24	23	24
RG2	3	30	35	23	26	25	24	24	26
RG2	4	29	33	22	30	28	24	24	25
RG2	5	34	33	28	26	28	26	24	27
RG3	1	48	44	60	52	60	27	27	55
RG3	2	46	43	57	51	58	31	27	54
RG3	3	47	42	53	50	53	33	28	49
RG3	4	53	46	49	50	43	33	28	46
RG3	5	49	52	45	58	47	34	29	47

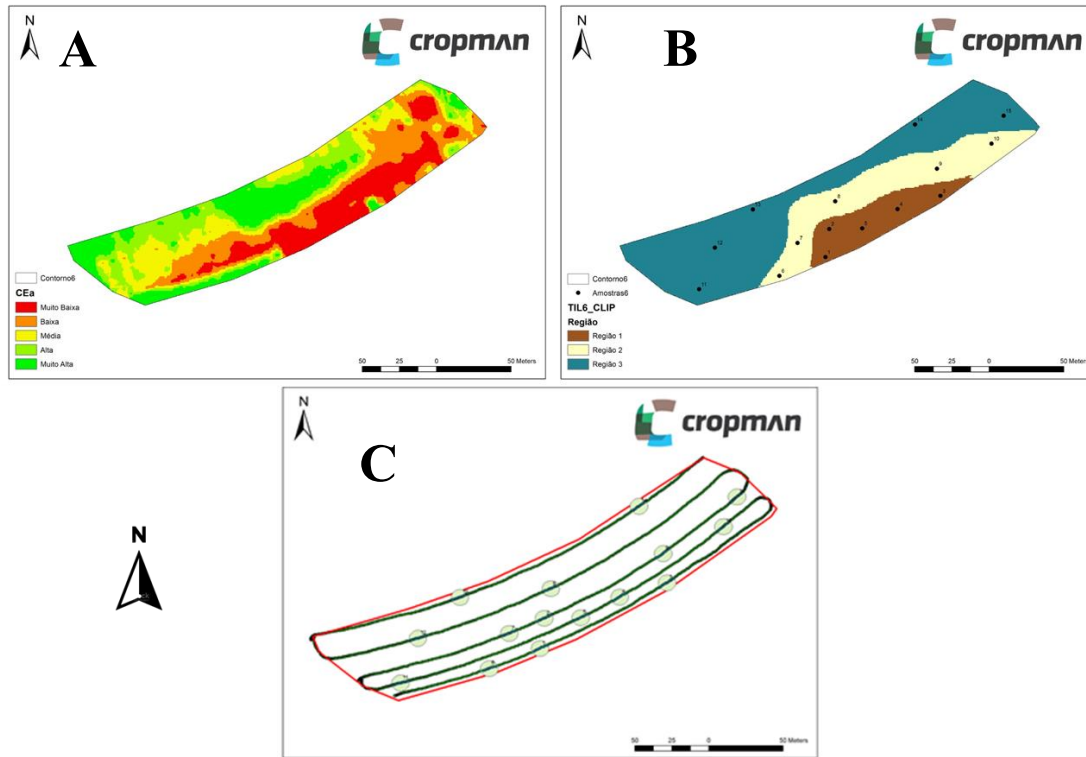


Figura 1. Mapa original de CEa do solo (A), Mapa de CEa do solo com amostras direcionadas e de validação das regiões de compactação do solo (B) e Mapa da grade amostral de solo – circunferência verde dentro do traçado vermelho (C).

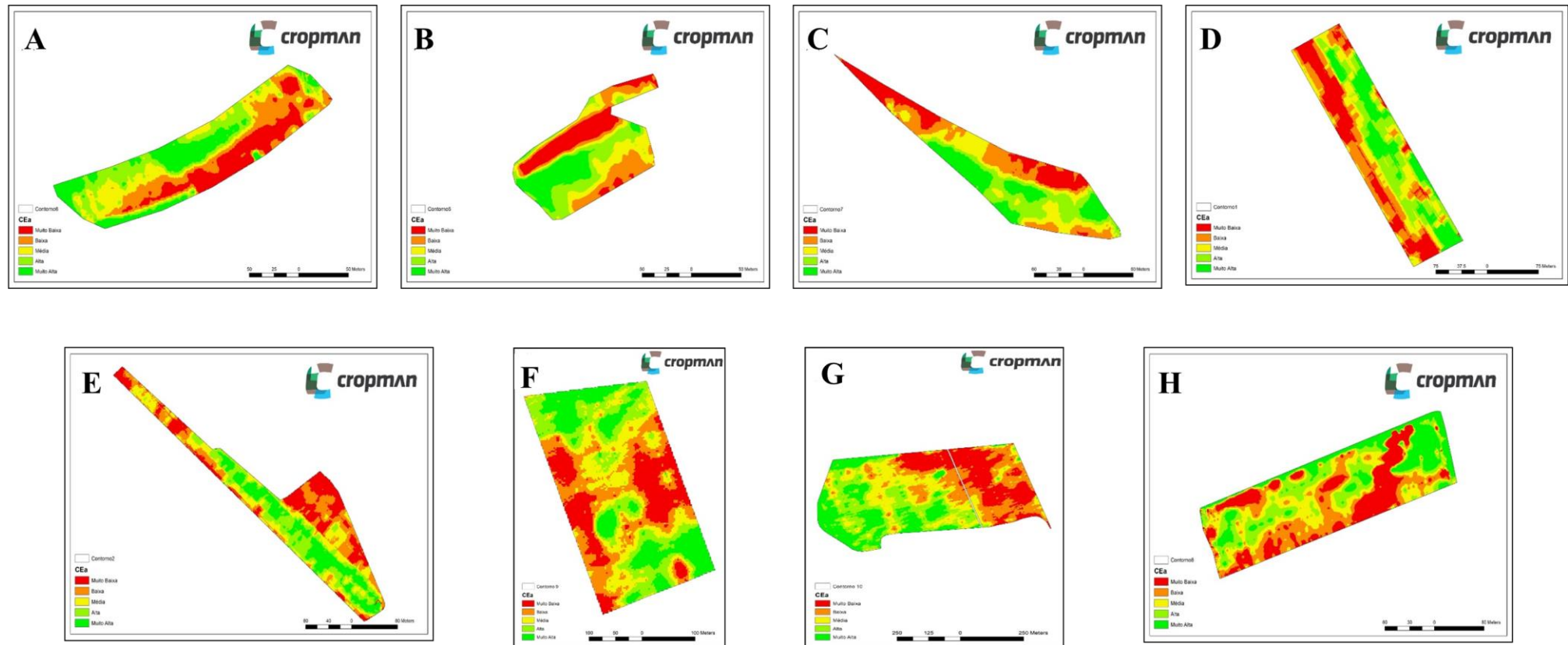


Figura 2. Mapas de variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) nas oito áreas cultivadas com cana-de-açúcar estudadas (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argilosa (G) e Muito argilosa (H)).

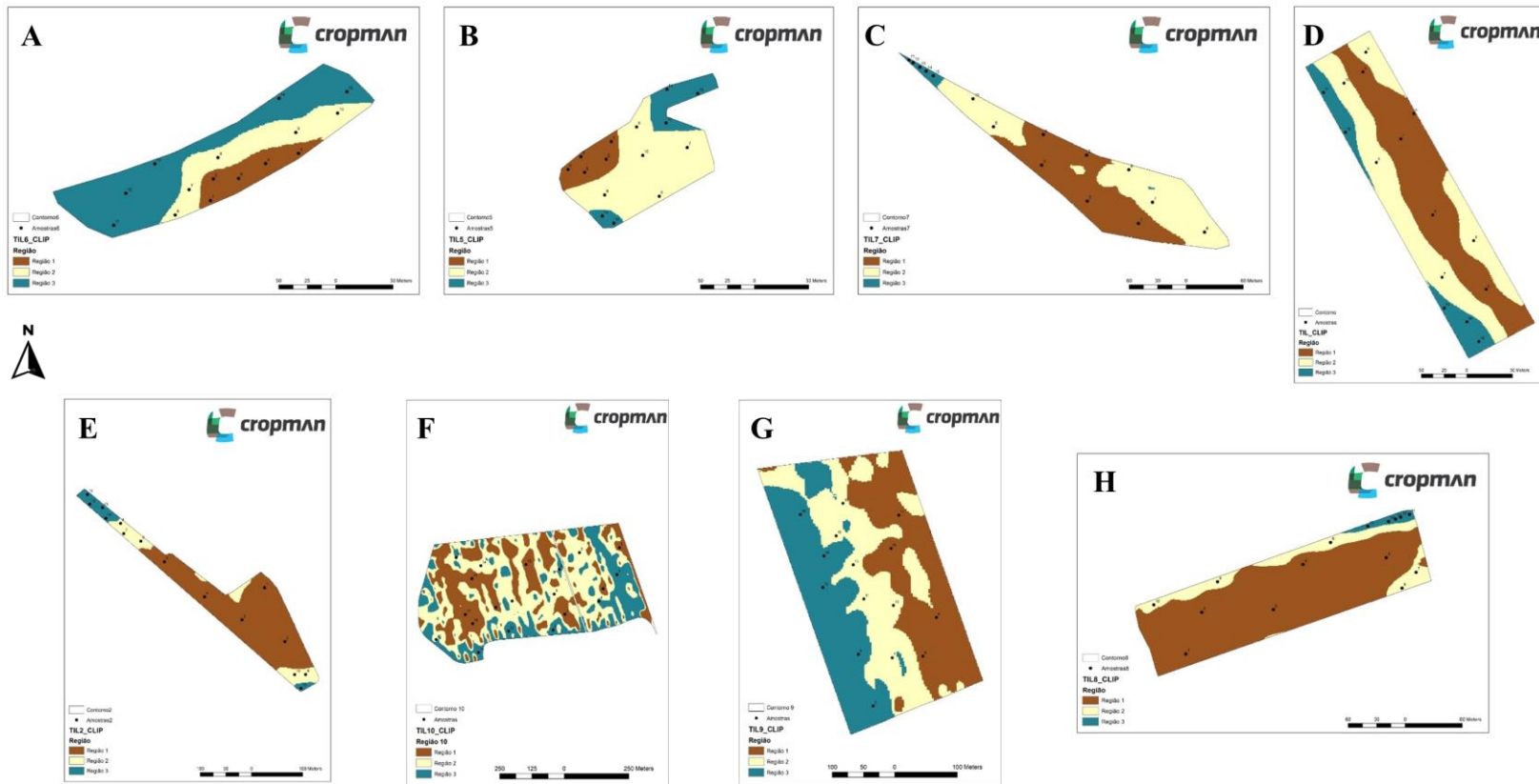


Figura 3. Mapas de variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), com pontos demarcados para validação direcionada das regiões de compactação do solo definidas pelo sensor nas oito áreas cultivadas com cana-de-açúcar estudadas (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)).

3.2.3. Coleta e preparo das amostras

As coletas à campo foram realizadas em três momentos, sendo primeira entre outubro de 2020 a novembro de 2020 nas áreas de Limeira e Bebedouro, a segunda em março de 2021 em Marapoama e a terceira em julho de 2021 em Morro Agudo. Em cada local foi realizado cinco repetições, assim foi aberto cinco trincheira (aproximadamente $0,40 \times 0,40 \times 0,40$ m), as amostras de solo foram coletadas usando cilindros metálicos de parede fina (5 cm de altura e diâmetro) que foram lentamente introduzidos no solo, camada por camada, em profundidades de solo de 0–10, 10–20, e 20–40 cm, os cilindros foram coletados no centro de cada camada (ou seja, 2,5–7,5 cm, 12,5–17,5 cm e 27,5–32,5 cm, respectivamente) para e obtenção de amostras indeformadas (umidade do solo, densidade do solo, porosidade total, resistência do solo a penetração em bancada) e amostras deformadas realizando a avaliação visual usando o método de avaliação visual da estrutura do solo (VESS). Além de coletados pontos amostrais por repetição de resistência do solo a penetração através do Penetrolog® (Falker Automação Agrícola Ltda– Porto Alegre). As amostras indeformadas foram conduzidas ao laboratório para realização das análises.

3.2.4. Resistência do Solo a Penetração

A resistência do solo a penetração do solo (RPC) adquiridos a campo, foi medida ao redor das trincheiras de amostragem do solo a uma profundidade de 60 cm, com uma condição de umidade do solo no estado independente, utilizando um penetrômetro manual (PenetroLOG, modelo PLG1020 com sistema eletrônico de aquisição de dados, sendo realizadas 25 pontos por local, ou, 5 por repetição do local), utilizando diâmetro de cone tipo 1 (diâmetro da base do cone de 20,27 mm) resolução de medida de 50 mm com velocidade máxima de inserção 50 mm s^{-1} . Os dados foram examinados e os valores de RPC foram calculados nos centros das camadas de 0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50 e 50–60 cm.

3.2.5. Avaliação Visual da Estrutura do Solo

As amostras foram retiradas uma amostra não deformada do solo de 25 cm de profundidade, 10 cm de espessura e 20 cm de largura usando uma pá, então realizamos avaliação pelo VESS nas profundidades de 0–10, 10–20 e 0–25 cm. Assim que coletada, foi feita a medição da profundidade da fatia de solo e posteriormente a avaliação, foi realizada a medição das camadas identificadas com qualidade de solo contrastante. Após o rompimento

manual inicial, foi medida e uma pontuação de qualidade do solo, Sq, foi atribuída a cada camada usando a carta de referência do VESS (Guimarães et al., 2011) – Sq varia de 1 (boa qualidade do solo) a 5 (má qualidade do solo). As características observadas para a atribuição de uma pontuação incluíram tamanho e forma dos agregados; porosidade externa e interna dos agregados, dificuldade de quebra dos agregados; forma e posição das raízes, entre outros (Guimarães et al., 2011). A pontuação geral para cada ponto amostral foi obtida calculando a média ponderada utilizando a profundidade de cada camada e o Sq da camada correspondente, de acordo com Cherubin et al. (2017), através da equação 1.

(1)

$$VESS_{Sq} = \sum_{i=0}^n \frac{Sq_i}{TT}$$

Onde, $VESS_{Sq}$ é a pontuação geral;

Sq_i : pontuação de cada camada identificado do solo;

T_i : espessura de cada camada identificado do solo;

TT : espessura total da amostra de solo.
















Qualidade Estrutural	Tamanho e aparência dos agregados	Porosidade visível e raízes	Aparência depois do manuseio: vários solos	Aparência depois do manuseio: mesmo solo diferentes manejos	Característica distintiva	Aparência e descrição de agregados naturais ou fragmento reduzido de ~ 1.5 cm de diâmetro
Qe1 Friável Agregados quebram facilmente com os dedos	Maioria < 6 mm após a quebra	Alta porosidade Raízes por todo solo			 Agregados pequenos	 A ação de quebrar o bloco é suficiente para revelá-los. Agregados grandes são compostos por agregados menores, presos pelas raízes.
Qe2 Intacto Agregados quebram facilmente com uma mão	Uma mistura de agregados porosos e redondos entre 2 mm – 7 cm Sem presença de torrões	Maioria dos agregados são porosos Raízes por todo solo			 Agregados altamente porosos	 Agregados quando obtidos são redondos, muito frágeis, despedaçam muito facilmente e são altamente porosos.
Qe3 Firme Maioria dos agregados quebram com uma mão	Uma mistura de agregados porosos entre 2mm - 10 cm; menos de 30% são <1 cm. Alguns torrões angulares não porosos podem estar presentes	Macroporos e fissuras presentes Porosidade e raízes: ambas dentro dos agregados			 Agregados com baixa porosidade	 Fragmentos de agregados são razoavelmente fáceis de serem obtidos. Apresentam poucos poros e são arredondados. Raízes geralmente crescem através dos agregados.
Qe4 Compacto Quebrar agregados com uma mão requer esforço considerável	Maioria > 10 cm e são sub-angulares não porosos; possibilidade de horizontalização; menos que 30% são <7 cm	Poucos macroporos e fissuras Raízes agrupadas em macroporos e ao redor dos agregados			 Macroporos bem distintos	 Fragmentos de agregados são fáceis de serem obtidos quando o solo está úmido, em forma de cubo muito angulosos e pontudos e apresentam fissuras intemamente.
Qs5 Muito compacto Difícil quebra	Maioria são maiores que > 10 cm, muito poucos < 7 cm, angular e não poroso	Porosidade muito baixa. Macroporos podem estar presentes. Pode conter zonas anaeróbicas Poucas raízes e restritas a fissuras			 Cor azul-acizentada	 Fragmentos de agregados são fáceis de serem obtidos quando o solo está úmido, no entanto, considerável força é necessária. Geralmente não apresentam poros ou fissuras.

Figura 4. Carta do método Análise Visual da Estrutura do Solo – VESS (Guimarães et al., 2011).

3.2.6. Densidade do Solo

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método dos cilindros metálicos, coletando uma amostra de estrutura indeformada com um volume interno de solo conhecida, a D_s foi calculada a partir do peso do solo seco na estufa a 105°C por 48 h (equação 2), para obtenção da umidade real a campo.

(2)

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

D_s = densidade do solo (Mg m^{-3})

m = massa do solo seco (g).

V = volume do cilindro (cm^3).

3.2.7. Porosidade Total do Solo

No laboratório, as amostras indeformadas foram saturadas lentamente pelo aumento da capilaridade por 48 h e então submetidos a um potencial matricial de -60 cm usando uma

mesa de tensão. O conteúdo gravimétrico de água no potencial matricial de -60 cm foi calculado como a diferença entre o peso úmido de cada núcleo do solo e após a secagem em estufa, e o conteúdo volumétrico de água (θ) foi calculado a partir da relação entre D_s e conteúdo de água gravimétrica. A partir das relações de teor de água e BD, calculamos a macroporosidade do solo (MaP) e a microporosidade (MiP), A D_p do solo foi assumindo um valor de densidade de partícula de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$.

A porosidade total (Pt) foi estimada pela relação entre a D_s e D_p , sendo que a densidade do solo considera o volume de poros mais o volume das partículas e a densidade das partículas considera apenas o volume de sólidos (Equação 3). Assim, é possível calcular o volume de poros assumindo a densidade de solo como resultado de uma média ponderada das densidades de partícula e do ar. A microporosidade (MiP) pode ser definida como o volume de poros do solo que possuem diâmetro menor que $0,05 \text{ mm}$ ($50 \text{ }\mu\text{m}$), correspondendo à água retida dos poros quando da aplicação e equilíbrio de um potencial matricial -60 cm (Equação 4). Os macroporos (MaP), possuem diâmetro maior que $50 \text{ }\mu\text{m}$ e são drenados quando as amostras são submetidas a tensão -60 cm (Kotlar et al., 2020), já os microporos com diâmetro menor que $50 \text{ }\mu\text{m}$ permanecem preenchidos com água quando as amostras são submetidas ao potencial matricial -60 cm, os macroporos são calculados através da Equação 5.

(3)

$$Pt = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right)$$

(4)

$$MiP = \theta_{60}$$

(5)

$$MaP = Pt - MiP$$

Onde Pt é a porosidade total do solo (m^3m^{-3}) e θ_{60} é o conteúdo volumétrico de água no potencial matricial de -60 cm.

3.2.8. Resistência do Solo a Penetração em laboratório

Em equilíbrio (na tensão de -60 cm), as amostras de solo foram pesados para determinar o teor de água e submetidos a testes de penetrômetro de solo (da Silva et al., 1994; Groenevelt et al., 2001) em bancada (RPI). Os ensaios do penetrômetro foram realizados na taxa de penetração constante por meio de um penetrômetro eletrônico para solo (Marconi® Equipamentos para Laboratório Ltda – Piracicaba), com ponta cônica de 4 mm e velocidade de penetração constante de 10 mm s^{-1} . As medidas foram tratadas de acordo com os procedimentos de Imhoff et al. (2010), excluindo 5 mm das porções superior e inferior.

3.2.9. Análises estatísticas

Todo dado coletado em campo e laboratório foi avaliado e validado estatisticamente, usando como métrica o desvio padrão do atributo avaliado. Técnicas estatísticas e de exploração de dados foram aplicadas para avaliar as correlações existentes entre todos os parâmetros coletados em campo. Foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$), então, realizou-se a análise de variância e comparação de médias pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Adicionalmente, foram verificadas correlações de Pearson entre os atributos físicos do solo para a camada total entre os tratamentos do solo pelo teste de correlação de Pearson. Os procedimentos estatísticos foram realizados no Software R (R Core Team, 2019).

3.3. Resultados

3.3.1. Indicadores de compactação do solo

Os valores médios de D_s e seus intervalos de confiança para ambas as áreas são apresentados na Fig. 5. Na maioria das áreas a D_s foi elevada e não houve diferença significativa entre as regiões de compactação independentemente da textura do solo. A única diferença ocorreu na área F na profundidade 10-20 cm ($p < 0,05$). Portanto, a separação em regiões de compactação encontradas pelo sensor não foi sensível a D_s . Assim como para D_s , não foram encontradas diferenças para RP_1 entre as diferentes regiões de compactação (Fig.6) apesar de a RP_1 ter sido menor na camada superficial do solo (0-10 cm), e maior nas camadas mais profundas (10-20 e 20-40 cm). Contudo em algumas situações pontuais ocorreu diferença significativa, como por exemplo para as áreas A (10-20 cm), C (10-20 cm), D (20-40 cm) e F (0-10, 10-20 cm). Juntamente com a RP_1 (Fig.6), a resistência a penetração a campo (RP_c) (Figura 7) foi medida com umidade a campo. No entanto, também não ocorreu diferença em nenhuma das áreas estudadas independente da textura, ambos os métodos de avaliação de resistência do solo a penetração não influenciaram para discriminar as três regiões de compactação sugeridas pelo sensor de indução eletromagnética de CEa.

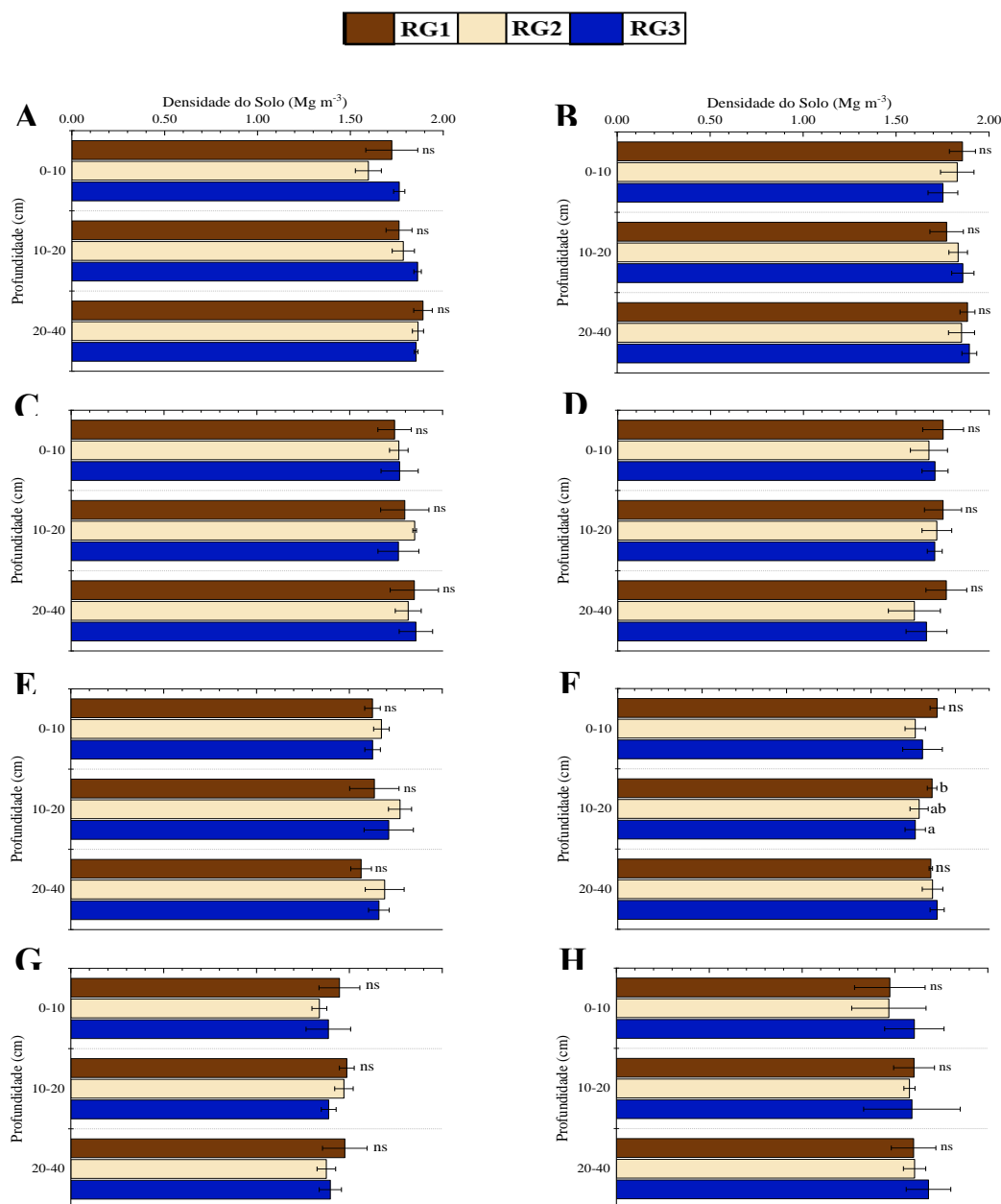


Figura 5. Densidade do solo para diferentes profundidades (0-10,10-20 e 20-40 cm) nas áreas estudadas (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Os valores médios dentro de cada área na mesma profundidade seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo. § RG1: Região 1; RG2: Região 2; RG3: Região 3.

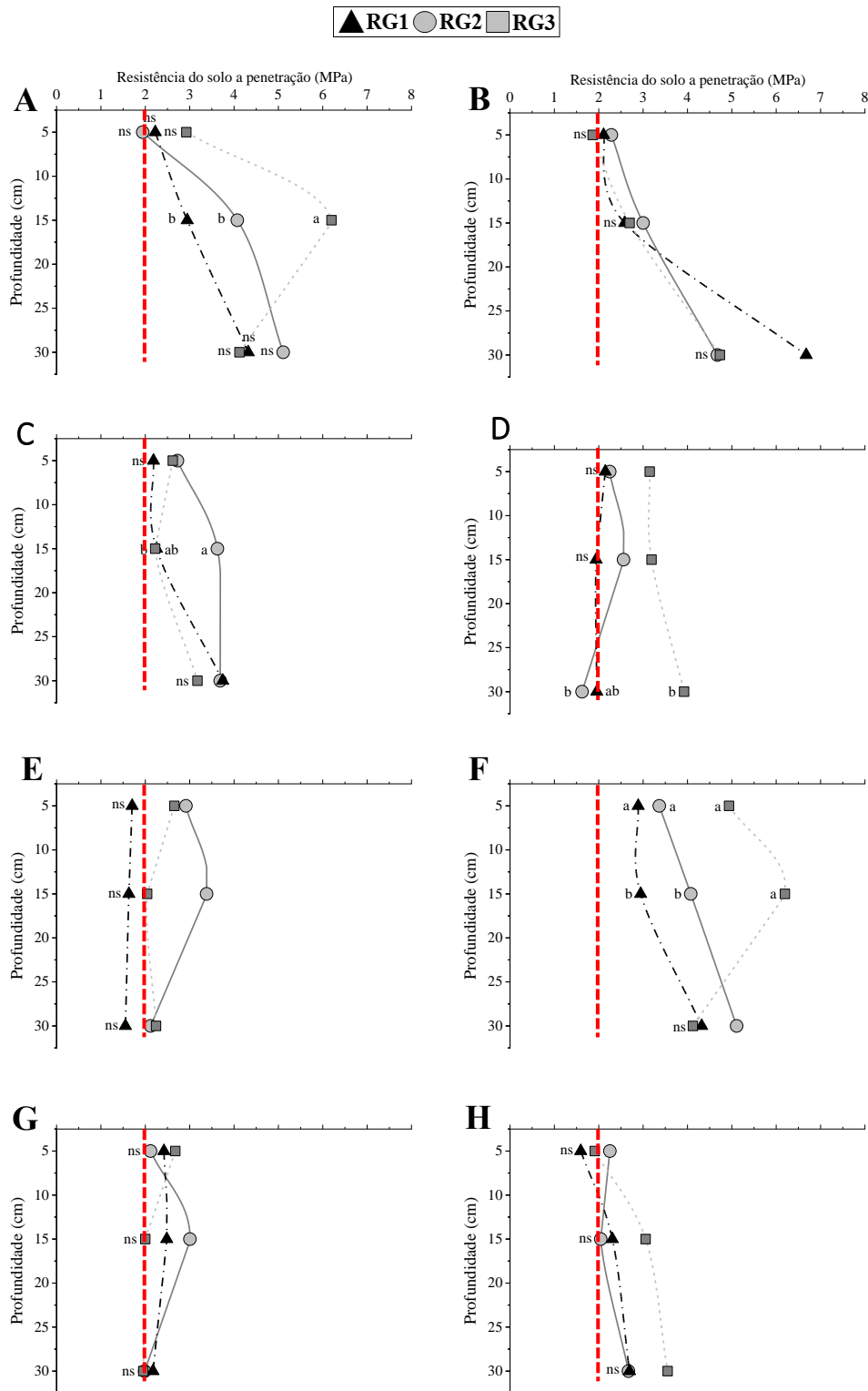


Figura 6. Resistência do solo a penetração para diferentes profundidades (0-10,10-20 e 20-40 cm) nas oito áreas estudadas (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Os valores médios dentro de cada área na mesma profundidade seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo; linha tracejada vermelha: limite crítico (2MPa). § RG1: Região 1; RG2: Região 2; RG3: Região 3.

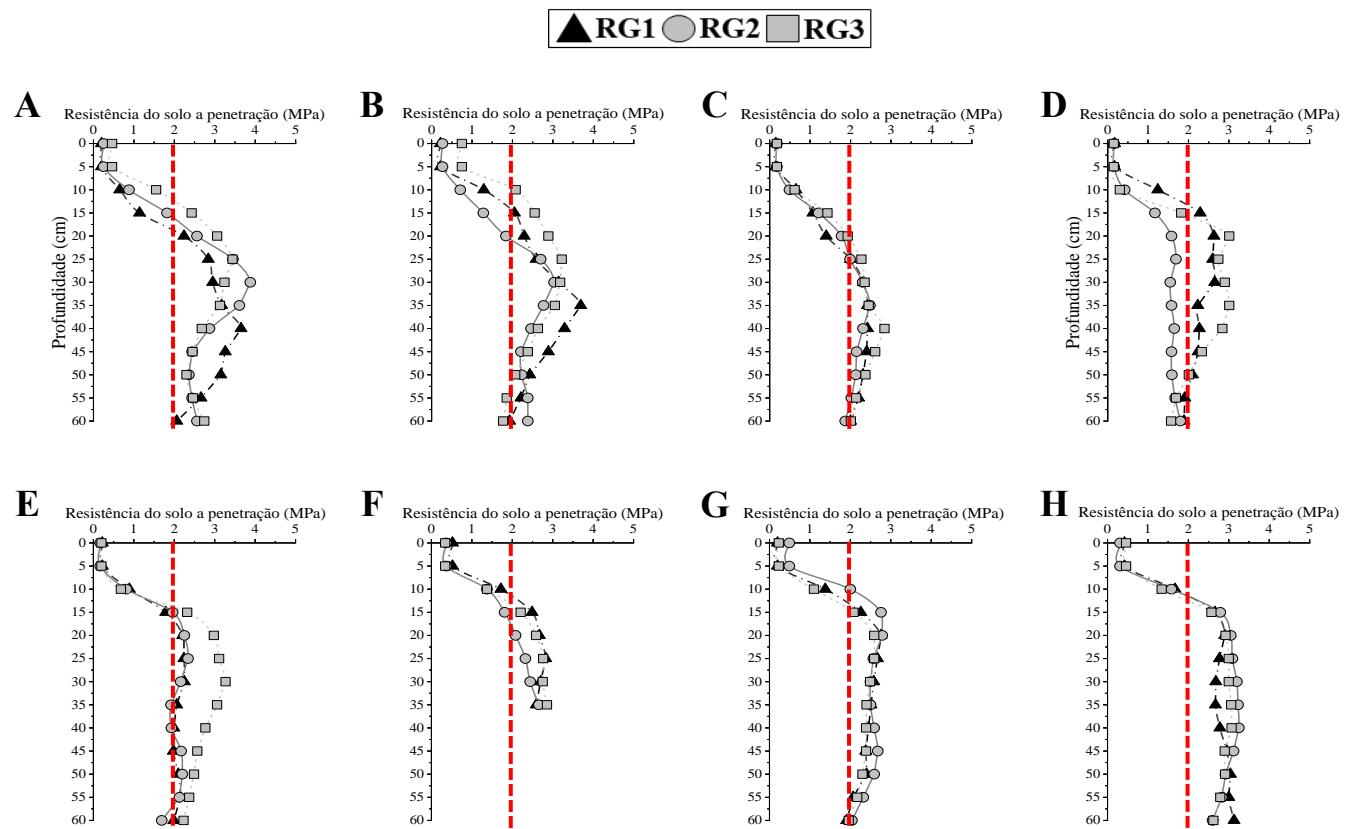


Figura 7. Resistência do Solo a penetração para diferentes profundidades (0-10,10-20 e 20-40 cm) e sob as áreas (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Os valores médios dentro de cada cenário na mesma profundidade; linha tracejada vermelha: limite crítico (2MPa). RG1: Região 1; RG2: Região 2; RG3: Região 3.

3.3.2. Indicadores de porosidade e VESS

A Porosidade total está fortemente ligada a dinâmica de água e gases no solo, no qual a quantificação da aeração é realizada por meio da macroporosidade (MaP), e a retenção de água por meio da microporosidade (MiP) do solo. A figura 8 apresenta os valores médios de porosidade do solo (Pt) para todas as áreas. Apenas a área F (10-20 cm) apresentou diferença ($p < 0,05$) em relação a Pt, enquanto que as demais não foram ocorreu diferença entre as regiões de compactação. A MaP não diferiu entre as regiões de compactação do solo independentemente da textura (Figura 8), exceto as áreas F (10-20 cm) e G (0-10, 20-40 cm) que apresentaram diferenças ($p < 0,05$). Em relação a MiP (Fig.10), nenhuma das áreas tiveram diferença significativa entre as regiões de compactação.

Os escores médios do VESS para as camadas superior (0-10 cm), inferior (10-25cm) e camada total (0-25 cm), são apresentados para todos as áreas de estudo na figura 9. Houve uma baixa variação nos valores de VESS para todas as áreas. Portanto, em todos os solos os escores foram similares a todas as camadas e regiões de compactação. Além disso, houve aumento nos escores de acordo com a profundidade estudada, entretanto, não apresentaram diferença ($p < 0,05$), sendo que apenas as áreas E (0-25 cm) e G (0-10 cm) apresentaram diferença ($p < 0,05$). Contudo, isso não foi relevante para caracterizar diferenças entre as regiões de compactação do solo.

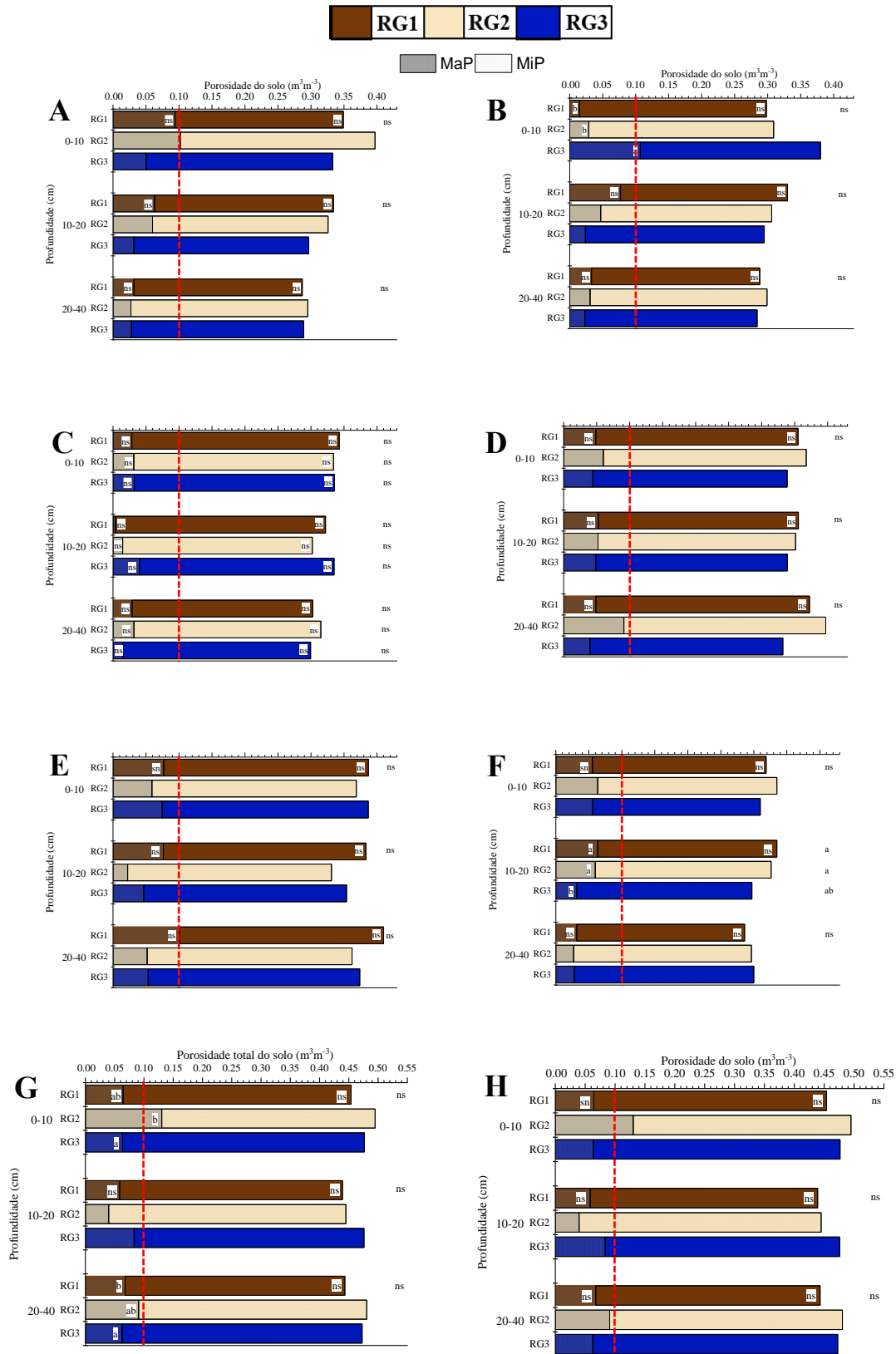


Figura 8. Porosidade do Solo (MaP/MiP) para diferentes profundidades (0-10,10-20 e 20-40 cm) e sob as áreas (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Os valores médios dentro de cada área na mesma profundidade seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo; linha tracejada vermelha: limite crítico ($0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$). RG1: Região 1; RG2: Região 2; RG3: Região 3.

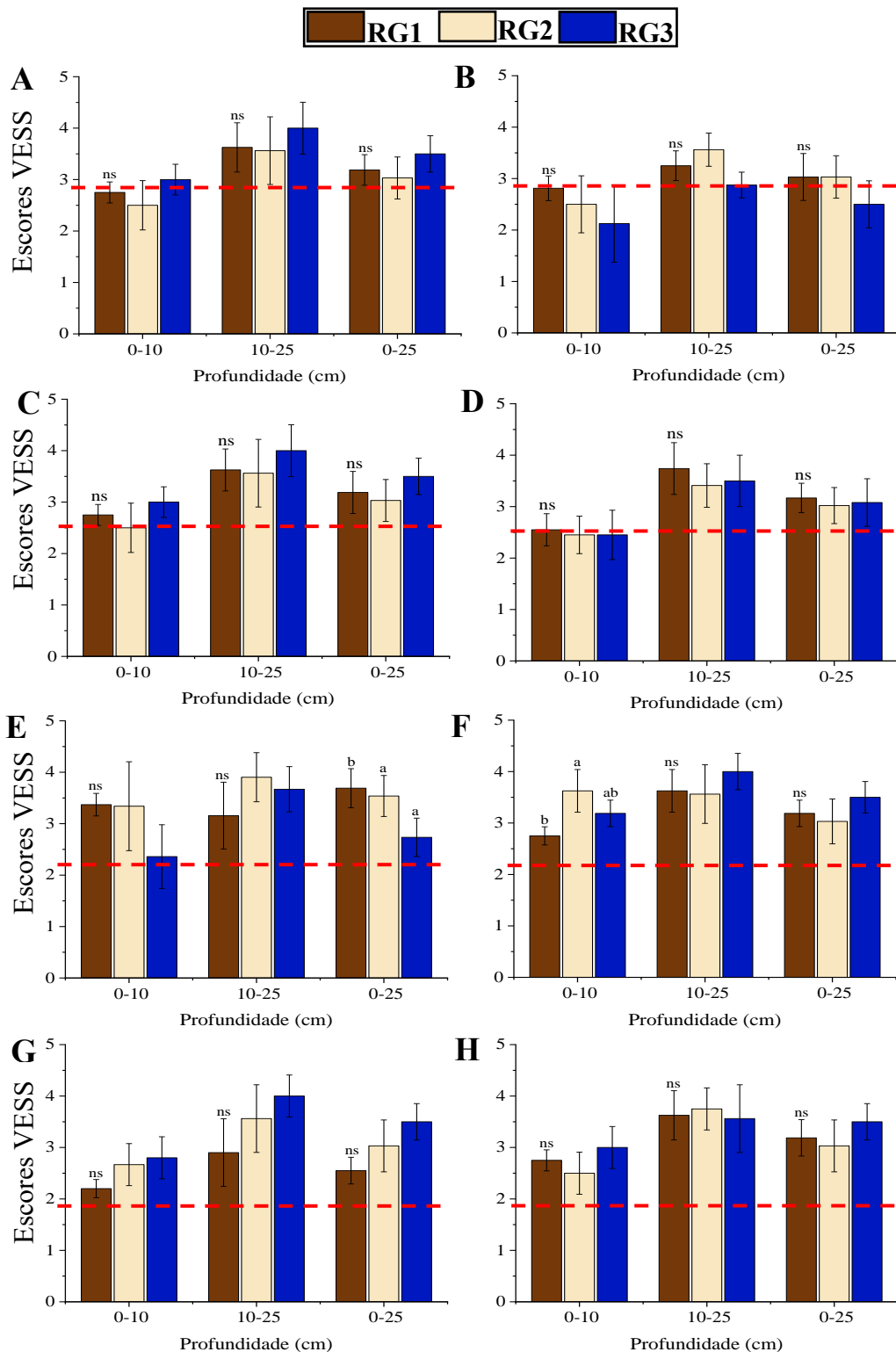


Figura 9. Escores do VESS para diferentes profundidades (0-10,10-20 e 0-25 cm) nas oito áreas de estudo (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Os valores médios dentro de cada área na mesma profundidade seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo; as barras representam o desvio padrão ($p < 0,05$); linha tracejada vermelha: limite crítico (Scores VESS: 3). RG1: Região 1; RG2: Região 2; RG3: Região 3.

3.3.3. Comportamento dos atributos físicos para diferentes texturas do solo

Nas figuras 10, 11 e 12 podemos observar que os atributos do solo dentro das regiões de compactação discriminadas pelo sensor de indução eletromagnética não tiveram um padrão de resposta ao longo do gradiente de textura estudado. Isso indica que não houve diferença na capacidade do sensor separar regiões com estados de compactação contrastantes nas diferentes texturas do solo. Como pode ser visto, solos mais argilosos apresentaram menores valores de Ds e RPI e maiores valores de Pt, MiP e MaP em relação a solos mais arenosos.

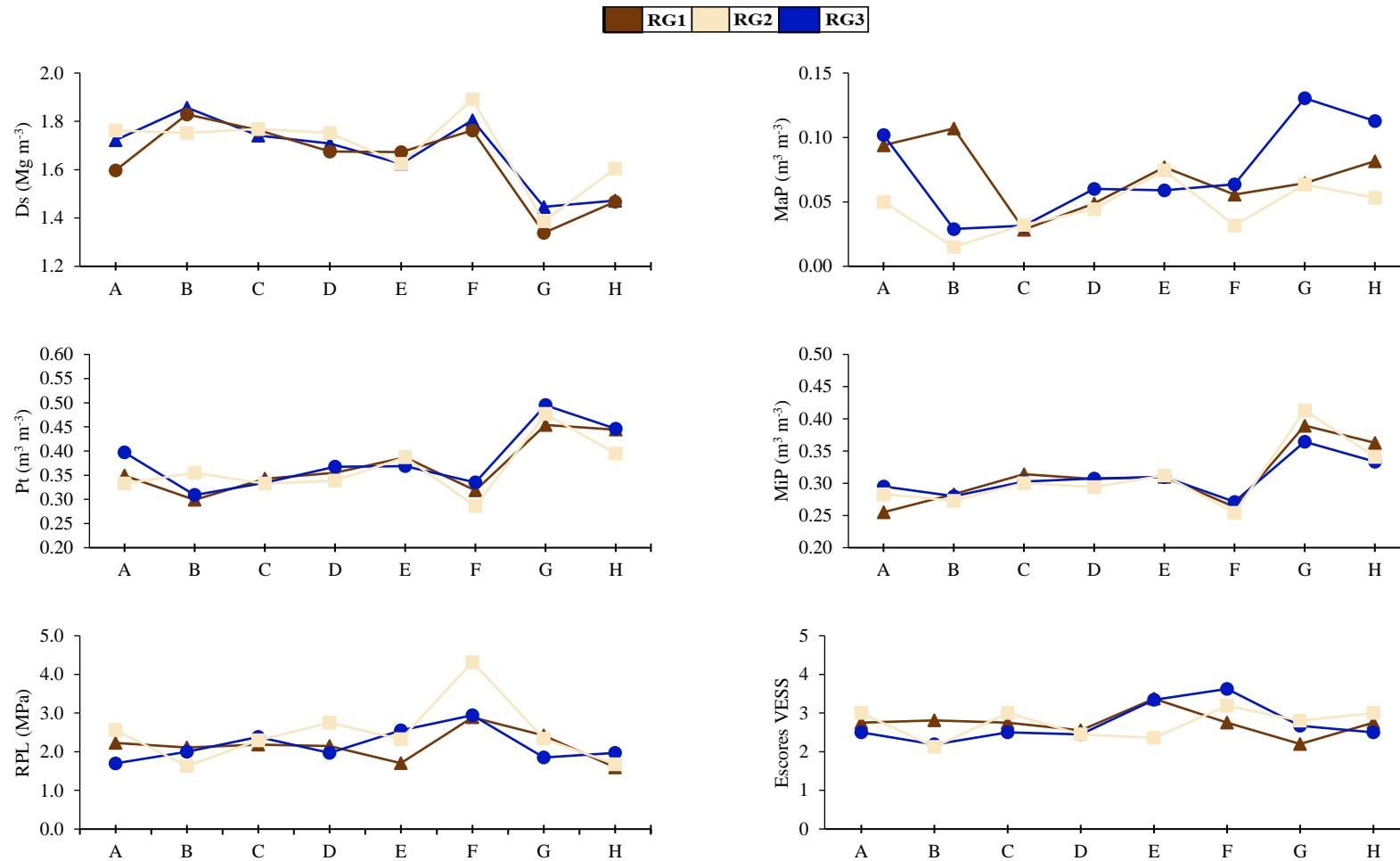


Figura 10. Comportamento dos indicadores físicos do solo (0-10 cm) ao longo do gradiente de textura nas três regiões (RG1, RG2, RG3) delimitadas pelo sensor de indução eletromagnética nas oito áreas de estudo (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Ds: densidade do solo, Pt: Porosidade total do solo, MaP: Macroporosidade, MiP: Microporosidade, RPL: Resistência do solo a penetração em laboratório, VESS: Análise Visual da Estrutura do Solo.

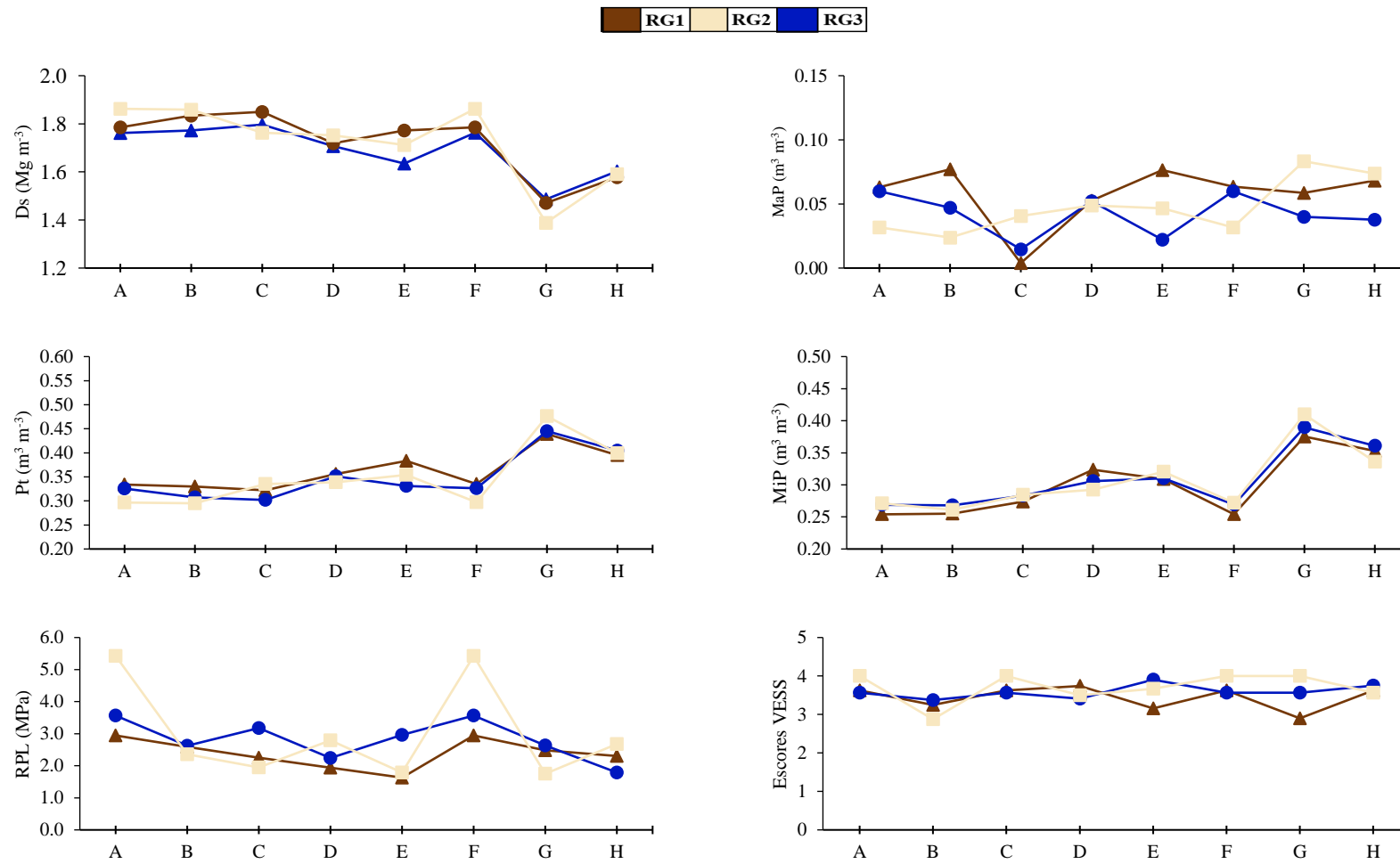


Figura 11. Textura do solo de acordo com os atributos físicos na camada 10-20 cm e sob as áreas (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Ds: densidade do solo, Pt: Porosidade total do solo, MaP: Macroporosidade, MiP: Microporosidade, RPL: Resistência do solo a penetração em laboratório; VESS: Análise Visual da Estrutura do Solo.

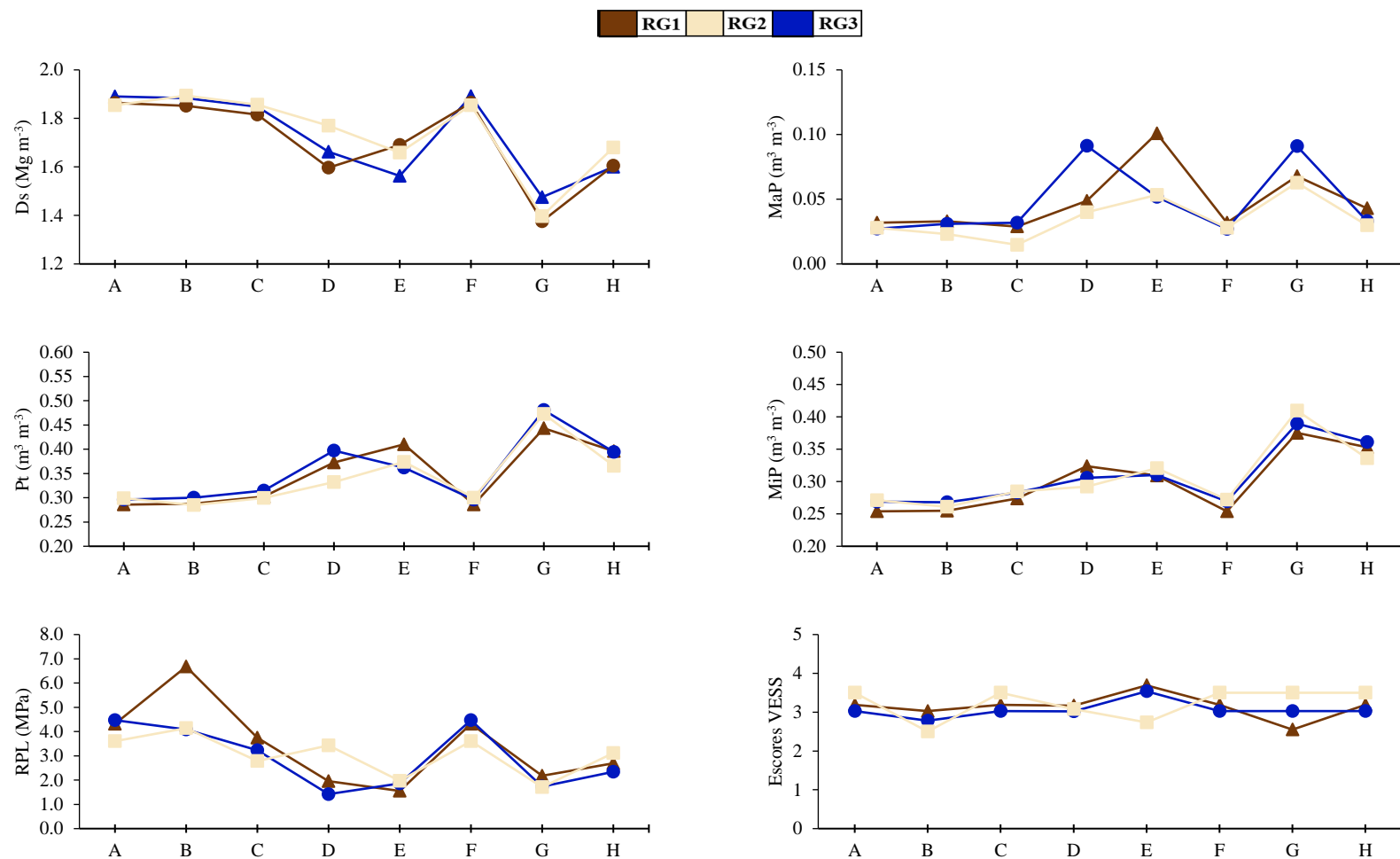


Figura 12. Textura do solo de acordo com os atributos físicos na camada 10-20 cm e sob as áreas (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). § Ds: densidade do solo, Pt: Porosidade total do solo, MaP: Macroporosidade, MiP: Microporosidade, RPL: Resistência do solo a penetração em laboratório, VESS: Análise Visual da Estrutura do Solo.

3.3.4. Grau de compactação do solo GC e Carbono orgânico do solo

O GC é um indicador de compactação do solo que afeta o funcionamento ecológico do solo alterando o fluxo de ar e água, disponibilidade de nutrientes, crescimento radicular e consequentemente a produtividade das plantas. Na literatura não encontramos valores para cana-de-açúcar críticos e ótimo, utilizamos o limite do GC crítico (GC_{cr}) de grãos que consiste em valores superiores a 85%, sendo prejudiciais a desenvolvimento radicular das plantas. Através destes valores observamos em nossos estudos pode auxiliar nas decisões sobre o manejo do solo, pois os dados tiveram uma variação de GC de 89 a 120%.

Para as oito áreas foram observados valores acima do GC_{cr} (i.e., 85%), independente do teor de argila. Para camada 0-10 cm (Figura 13), os menores valores encontrados foram na área G ($0,47 \text{ kg kg}^{-1}$) com valores de 96, 89 e 92% para RG1, RG2 e RG3 respectivamente. Por outro lado, os maiores valores encontrados foram na área F ($0,37 \text{ kg kg}^{-1}$), com valores de 114, 112 e 120% para RG1, RG2 e RG3 respectivamente. Independente da textura, o GC foi superior a 85 %. Na camada de 10-20 cm (Figura 14), a área D apresentou menores valores de GC na RG1 (97%) e RG2 (97%), enquanto a área G apresentou menor valor na RG3 (93%). Nesta mesma camada, a área H apresentou maiores valores para todas as regiões de compactação, sendo RG1, RG2 e RG3 com valores de 119, 118 e 118%, respectivamente.

Na Figura 15, é apresentado os valores de GC para a camada 20-40 cm. Pode-se observar que novamente, a área D apresentou menores valores na RG1 (95%) e RG2 (91%), e a área G na RG3 (93%) apresentou menor valor para esta camada. Já os maiores valores de GC foram encontrados para a RG1 (120%) na área F, da mesma forma que a RG2 e RG3 foram encontrados na área H, respectivamente com valores de 119 e 124%.

Os valores de carbono orgânico do solo (COS) variaram de 7% a 19% apresentados para camada 0-20 cm (Tabela 1), sendo um fator com potencial no GC. De acordo com os dados, o tráfego de máquinas resultou em uma compactação efetiva no solo, evidenciadas pelos elevados valores de GC_{cr} , a compactação ocorreu em todos os teores de argila, atuando na zona alta compactação do solo (zona vermelha). Independente do teor de argila, todos os solos são suscetíveis à compactação do estresse aplicado por elevadas cargas e intensidade de maquinário agrícola. O grau de compactação não indicou discriminação entre as áreas, diferindo do sensor.

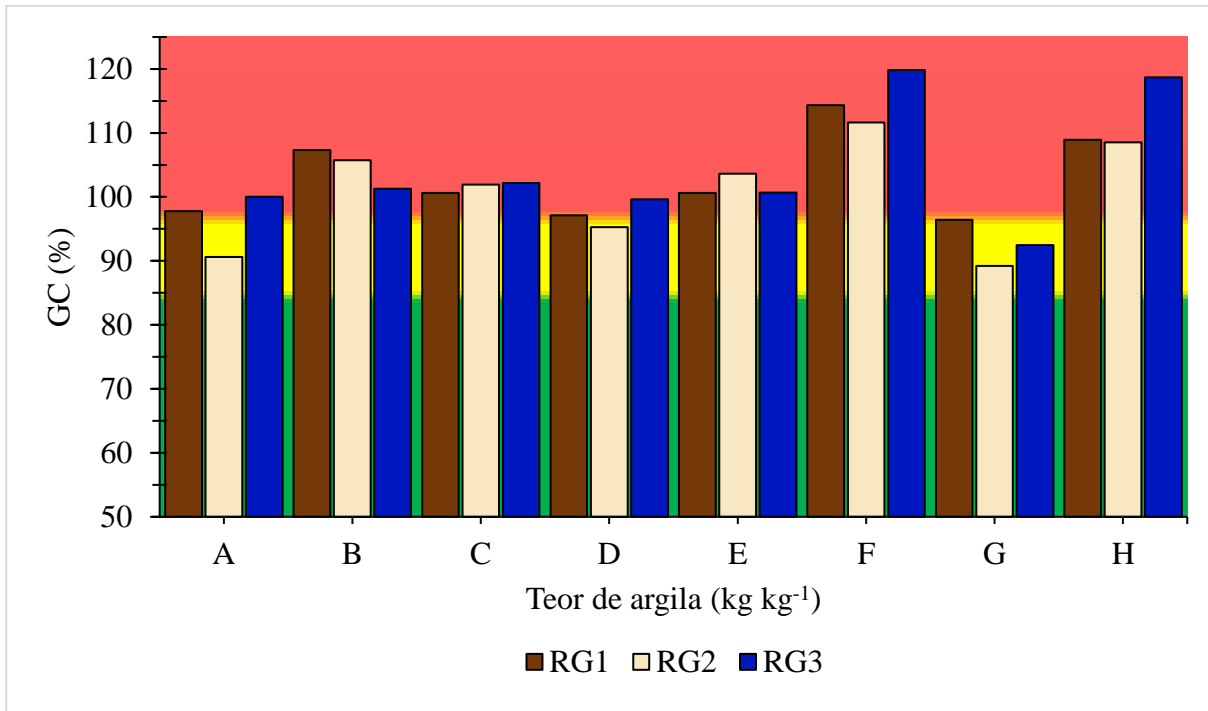


Figura 13. Grau de compactação (GC) para a camada 0-10 cm, de acordo com o teor de argila para as três regiões de compactação. (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Descrição das zonas de compactação: zona de baixíssima qualidade (zona vermelha) valores superiores a 98%, zona de baixa qualidade (zona amarela) com valores superiores a 85%, zona de boa qualidade (zona verde) valores inferiores a 85%.

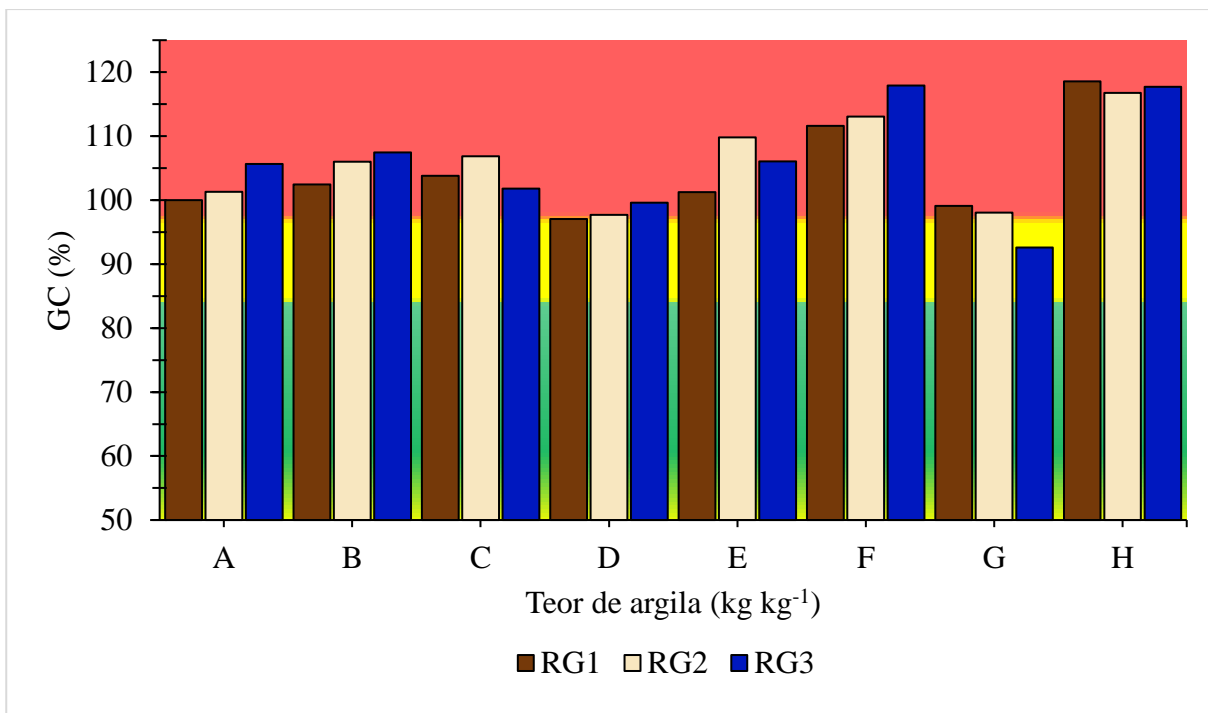


Figura 14. Grau de compactação (GC) para a camada 10-20 cm, de acordo com o teor de argila para as três regiões de compactação. (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argiloso arenoso (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Descrição das zonas de compactação: zona de baixíssima qualidade (zona vermelha) valores superiores a 98%, zona de baixa qualidade (zona amarela) com valores superiores a 85%, zona de boa qualidade (zona verde) valores inferiores a 85%.

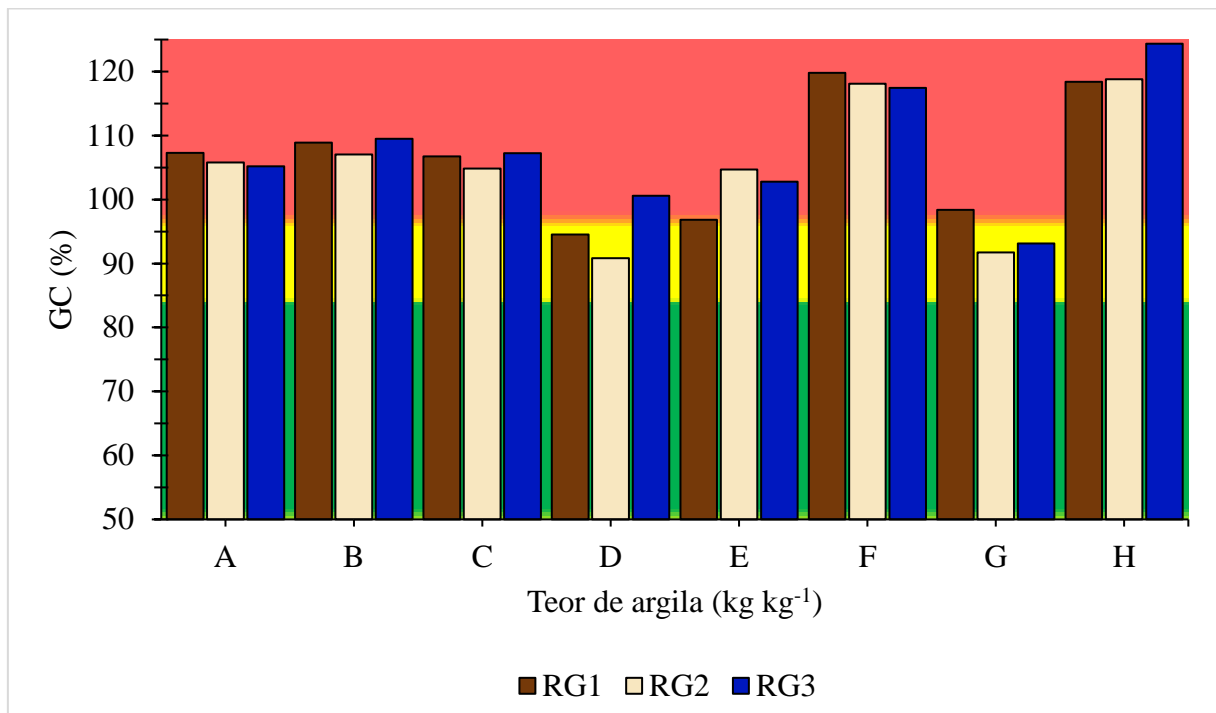


Figura 15. Grau de compactação (GC) para a camada 20-40 cm, de acordo com o teor de argila para as três regiões de compactação. (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Descrição das zonas de compactação: zona de baixíssima qualidade (zona vermelha) valores superiores a 98%, zona de baixa qualidade (zona amarela) com valores superiores a 85%, zona de boa qualidade (zona verde) valores inferiores a 85%.

3.3.5. Correlações entre indicadores físicos do solo nas diferentes áreas

A Fig. 16 apresenta a matriz de correlação de Pearson entre os indicadores físicos do solo avaliados em cada área de estudo para camada 0-40 cm. Os resultados mostraram correlações significativas entre os atributos físicos do solo (Ds, Pt, MaP, MiP, RPI e VESS), colaborando para confiabilidade dos dados obtidos em laboratório. A Ds e a Pt são os principais indicativos do processo de compactação do solo, tendo correlações negativas entre si. A Pt teve correlação positiva com a MaP e correlação negativa com RPI para todas as áreas, o contrário ocorre para a Ds que teve correlação positiva com RPI e negativa com MaP. Além disso, ambos atributos Pt e Ds não foram correlacionados com MiP na maioria das áreas, apenas nas áreas C e D, onde houve correlação negativa. Em texturas acima de 0,30 kg kg⁻¹, a RPI teve correlações positivas com a Ds e Mi, e negativas com Pt e Ma. Do mesmo modo, a RPI teve correlação positiva com o VESS na maioria das áreas, exceto na área A e C.

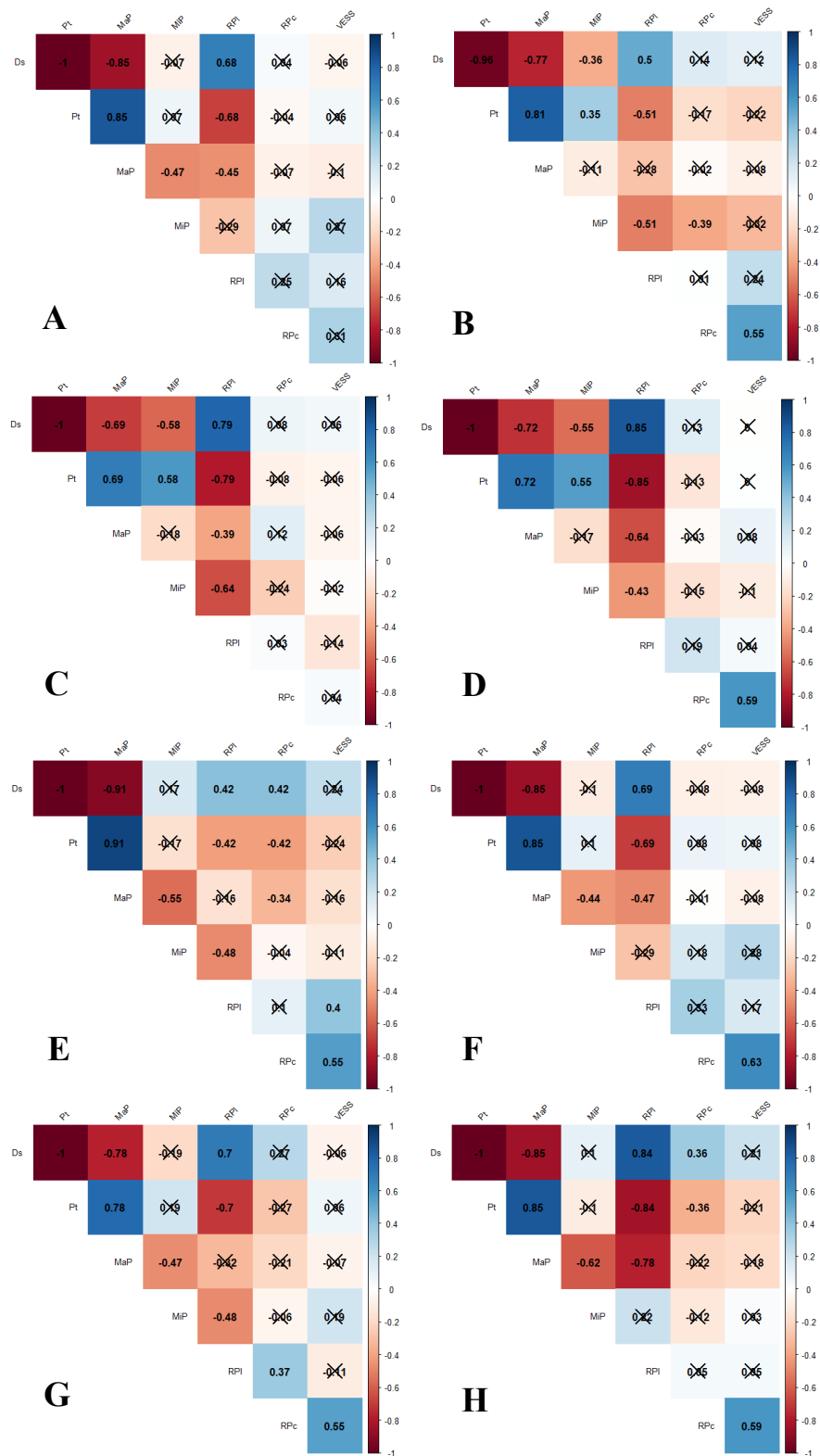


Figura 16. Matriz de correlação de Pearson entre as áreas e os atributos físicos de 0-40 cm (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)). Ds: densidade do solo, Pt: Porosidade total do solo, MaP: Macroporosidade, MiP: Microporosidade, RPI: Resistência do solo a penetração em laboratório, RPe: Resistência do solo a penetração em campo, VESS: Análise Visual da Estrutura do Solo.

3.3.6. Correlações entre todos os atributos com a frações granulométricas

A Fig. 17 apresenta a matriz de correlação de Pearson entre os atributos físicos do solo com as frações granulométricas para todas as áreas. De forma geral, os atributos argila, silte e areia tiveram correlação com a maioria dos atributos físicos do solo, sendo maiores com Ds, Pt e MiP do solo. Os escores de VESS não foram correlacionados com as frações granulométricas e nem com a maioria dos indicadores determinados em laboratório, mas se correlacionaram positivamente com a RP de laboratório e de campo.

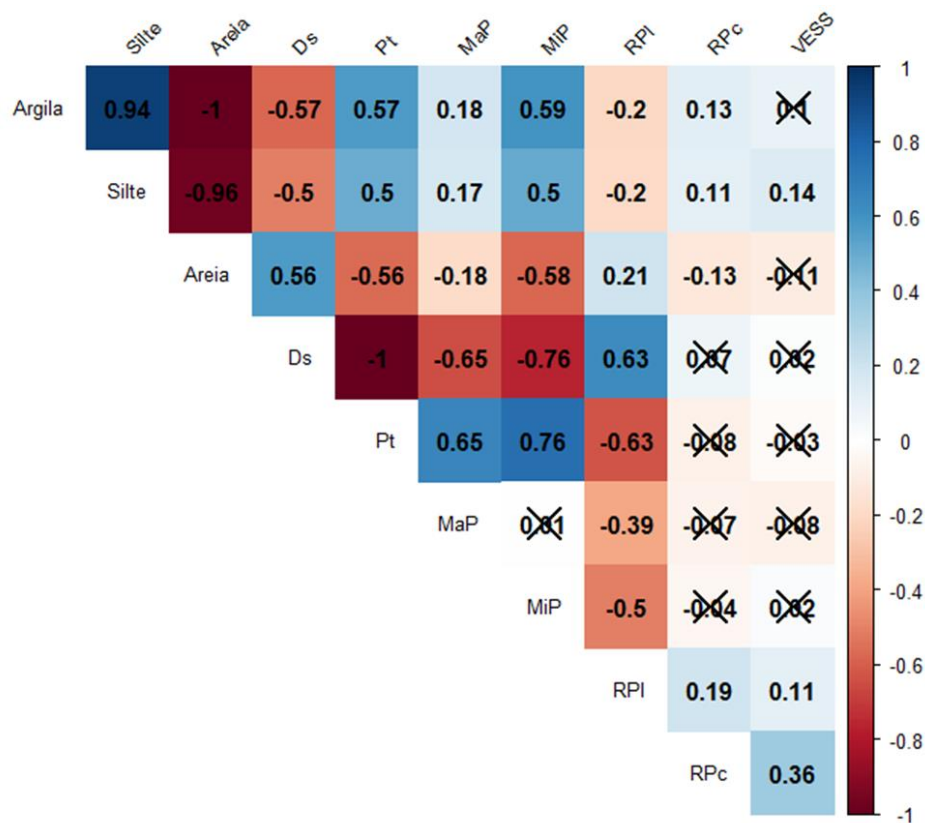


Figura 17. Matriz de correlação de Pearson entre indicadores físicos do solo incluindo dados das oito áreas de estudo na camada 0-40 cm (Classe Franco arenoso (A, B e C), Franco argiloso arenoso (D e E), Argilo arenosa (F), Argiloso (G) e Muito argiloso (H)), n=288. Ds: densidade do solo, Pt: Porosidade total do solo, MaP: Macroporosidade, MiP: Microporosidade, RPI: Resistência do solo a penetração em laboratório, RPC: Resistência do solo a penetração em campo, VESS: Análise Visual da Estrutura do Solo.

3.4. Discussão

As áreas avaliadas abrangeram uma ampla faixa de teor de argila, visando correlacionar um bom indicador físico do solo utilizado tradicionalmente com as leituras de CEa para o diagnóstico da compactação do solo em larga escala em diferentes áreas. No geral, houve pouca variação nos atributos físicos do solo dentro das regiões de compactação (RG1,

RG2 e RG3) propostas pelo EMI de CEa em todas as áreas (Fig. 10, 11, 12). Esse resultado indica que a discriminação das regiões realizadas pelo sensor EMI de CEa apresentaram mesmo grau de compactação e assim não foi sensível ao efeito da compactação do solo. Portanto, os resultados demonstram que a abordagem que está sendo utilizado para discriminação de regiões de compactação usando CEa, precisa ser aprimorado, pois não conseguiu isolar os fatores da compactação com precisão.

Os sensores de EMI de CEa medem o potencial do solo de conduzir corrente elétrica, através de padrões temporais de secagem/umedecimento. Nossa hipótese que a CEa pode estar correlacionado com outros fatores do solo que apresentam graus de polarização e/ou ionização, ou, desempenham papel de induzir ou propagar correntes elétricas (Corwin e Scudiero, 2020), como por exemplo sais e nutrientes (íons solúveis) (Rhoades et al., 1976), umidade do solo (Brevik et al., 2006; Garré et al., 2011; Calamita et al., 2017), como também descrito por Friedman et al. (2005). Em estudo de Melo et al. (2021) descreve os atributos que afetam a resistividade elétrica do solo (inverso, CEa), neste estudo encontraram que o conteúdo de água no solo tem maiores efeito na resistividade do solo que a compactação do solo. Assim como, a CEa em solos não saturados, é influenciada diretamente pelo conteúdo de água do solo, presença de partículas de sólidos carregadas (e.g., matéria orgânica e minerais de argila). Além disso, de acordo com Martinez et al. (2021) o conteúdo de água no solo tem relação direta com CEa. No entanto, em algumas situações a umidade transitória ao longo do perfil do solo, devido a textura do solo, matéria orgânica do solo (Martinez et al., 2009), densidade solo e estrutura do solo (Corwin e Lesch, 2005, Doolittle e Brevik, 2014), porosidade do solo (Calamita et al., 2015) pode alterar a relação entre conteúdo de água no solo e CEa, podendo ter efeitos na variabilidade temporal da CEa. Além disso, o sensoriamento proximal através da CEa não realiza leitura de apenas uma propriedade do solo (Cho et al., 2016), sendo indicador indireto de importantes propriedades físicas do solo ao longo do perfil (Sudduth et al., 2010). Isto dificulta a leitura correta dos dados, tornando uma incerteza sobre a coerência e isolamento dos dados de CEa para compactação do solo.

Em solos brasileiros o EMI de medição de CEa através da resistividade do solo é comumente utilizado para fazer medições de umidade do solo e definição de zonas de manejo. Todavia, ainda há poucos estudos avaliando a variabilidade espacial na física do solo (Sanchez et al., 2018; Sanchez et al., 2019a; Sanchez et al., 2019b). Assim, para buscar resultados eficientes é necessário buscar abordagens associadas e combinadas com outros sensores (Adamchuk et al., 2011). Portanto, é muito difícil quantificar as propriedades do solo

isoladamente com os dados fornecidos, necessitando de estudos com abordagens mais difusas, buscando medir variáveis adicionais do solo que são influenciadoras da CEa do solo.

Ao investigarmos os efeitos CEa na compactação do solo, supomos uma segunda hipótese para não obtenção de respostas satisfatórias, sendo está devido a todas as áreas estudadas estarem com elevados GC (Fig. 13,14 e 15), compactadas. Para todos os atributos foram observados valores acima do limite crítico, isso resultado da compactação já existente nas áreas estudados, independente da textura e ciclo estudado. A compactação é a redução da porosidade e aumento da massa de solo em um mesmo volume (Horn et al., 2003). Portanto, através da Ds podemos medir de forma simples as alterações e compactação do solo (Lima et al., 2017). Contudo, a Ds é sensível a variação textural do solo, o que torna o GC um indicador imprescindível para avaliação da compactação do solo em solos com diferentes classes texturais.

A Ds, Pt e RP são as principais avaliações de compactação do solo. Os solos deste estudo abrangeram uma ampla gama de classes texturais com teores de argila variando de $> 0,17 \text{ kg kg}^{-1}$ até $0,60 \text{ kg kg}^{-1}$. Destacamos que as correlações dos atributos físicos tiveram correlações (Fig. 16), e para as áreas e para a matriz de correlação geral (Fig. 17), solidificando a pesquisa realizada em laboratório.

Conforme apresentado na Fig.5, os valores de Ds foram superiores aos valores considerados limitantes ($1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ no arenoso e $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ nos solos argilosos (Reynolds et al., 2002)) para o crescimento das culturas em todas as áreas estudadas. Conforme Reichert et al. (2009), a compactação do solo causa restrições no crescimento radicular entretanto em alguns casos não reduz sua produtividade, devido a tolerância a compactação de algumas culturas. Os valores elevados de Ds revelam que ocorreu uma ruptura dos agregados do solo, uma perda de volume e poros do solo. O aumento da Ds ocasiona a diminuição dos poros vazios do solo, entretanto, isoladamente a Ds é considerada uma medida pobre da estrutura do solo (Keller et al., 2011), necessitando uma abordagem integrada para avaliação da compactação do solo. Além de provocar alterações na porosidade do solo, a Ds e RP correlacionaram-se positivamente (Fig. 16 e 17). Além disso, de acordo com Asgarzadeh et al. (2010; 2011), a RP pode ser alterada sem a mudança no volume do solo, o que indica que a RP pode ser alterada apenas pela mudança de distribuição e tamanho dos poros e/ou através do teor de umidade. A RP é dependente dos valores de Ds e teor de água do solo (Vaz et al., 2011), nosso estudo a RPI do solo obteve informações contrastantes a Ds. De acordo com Keller et al., (2011), a RP é influenciada pela estrutura do solo.

Os resultados deste estudo indicam que, na maioria das camadas, a RPI atingiu valores superiores a 2,0 MPa (Fig. 6), assim, sendo limitante ao crescimento radicular e desenvolvimento pleno da cana-de-açúcar (Barbosa et al., 2017). Estes elevados valores de Ds e RPI são características dos efeitos adversos causados no solo decorrente do tráfego de máquinas no momento das operações em áreas de cana-de-açúcar, o estresse acumulativo aplicado durante os diferentes ciclos da cultura excede a capacidade de suporte de carga do solo, levando a compactações mais severas, principalmente em períodos de colheita. Além disso podemos constatar que os maiores valores de RP do solo se encontravam na camada subsuperficial, geralmente devido ao preparo convencional do solo (Keller et al., 2017). Consequentemente, com o aumento na resistência do solo a penetração as raízes necessitam exercer maiores forças e tensões mecânicas para penetrar no solo (Keller et al., 2017).

Quando analisamos a relação entre RPI e RPc observamos que as diferentes metodologias não apresentaram correlação positiva (Fig. 17). Este resultado pode ser explicado pelo fator umidade do solo. Enquanto na determinação da RPI a umidade é controlada e padronizada próximo a capacidade de campo do solo, a RPc apresenta uma série de dúvidas nas informações, principalmente por leituras sob condições de umidades fora da capacidade de campo. Portanto, na avaliação da RPc a umidade do solo no momento da avaliação deve ser mensurada. De acordo com Peixoto et al. (2019) a resistência do solo a penetração a campo apresenta o solo no momento de menor sensibilidade a compactação, e quando próximo a capacidade de campo com maior suscetibilidade do solo a compactação.

Os resultados mostraram redução da Pt ao longo do cultivo da cana independente das variáveis, em especial a MaP, que teve perdas irremediáveis pela compactação do solo em todas as áreas e todas as camadas. A Pt regula funções hidráulicas e de aeração do solo (Jimenez et al., 2021), portanto, a redução na Pt resulta na diminuição da condutividade hidráulica do solo e aeração (Horn et al., 2019; Keller et al., 2019), como observados nos primeiros 40 cm de profundidade estudados, a zona que ocorre maior atuação radicular da cana-de-açúcar. Conforme Souza et al. (2014) a redução da Pt restringiu gravemente o desenvolvimento radicular, reduzindo sua produtividade. Esta redução na Pt está frequentemente associada a redução da MaP. De acordo com a Fig. 12, em todas as áreas a MaP foi inferior a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, considerado valor crítico para porosidade de aeração mínima (Silva et al., 1994). Em solos, não saturados os macroporos ficam preenchidos com ar, na medida que ocorre a compactação do solo estes poros de ar são expelidos e a redução da MaP é observada. Resultados semelhantes foram observados por outros autores em áreas cultivadas com cana-de-açúcar (e.g., Cherubin et al., 2016; Reichert et al., 2018; Cavalcanti et al., 2020).

A compactação do solo modifica a distribuição dos poros no solo, reduzindo e interrompendo a conectividade da rede de poros, principalmente dos macroporos presentes no solo (Bottinelli et al., 2015), assim comprometendo o sistema radicular da cana-de-açúcar (Souza et al., 2014), a MiP parcialmente alterada. A MiP aumentou devido a compactação em todos as áreas, independente do ciclo ou textura estudados, ocasionada pelas operações agrícolas este aumento da MiP é decorrente das alterações ocorridas na MaP do solo. A diminuição dos poros grandes ocasionou aumento nos poros pequenos presentes, confirmado pelos estudos de Castioni et al. (2021), que a redução MaP está diretamente relacionada ao aumento da MiP, além do que, alterações na MiP são é complexa de ser explicadas quando já se encontra algum grau de compactação no solo, nosso caso, devido as alterações que provoca na morfologia do sistema poroso e afetando o sistema de retenção de água.

A porosidade considera semelhante a macroporosidade do solo quando diminuída, resulta no aumento dos poros texturais ou microporos, perante a redução dos poros maiores em poros menores durante o processo de compactação do solo. Pois ocorre a mudança na distribuição e geometria dos poros dependente das cargas aplicadas e na resistência inicial do solo (Bruand e Cousin et al., 1995), assim afeta as propriedades hidráulicas do solo, faixa onde atua os microporos do solo (Richard et al., 2001). A MiP causa maior retenção de água no solo, conseqüentemente com o aumento da compactação, ocasionada redução dos macroporos, estando associado a tensão aplicada no solo. Então podemos afirmar que a MiP é alterada pela indução da redução da MaP., por fim, o impacto das operações agrícolas causa modificações relevantes da MiP.

E através dos dados do VESS podemos observar que para maioria das áreas, obtivemos valores considerado escores críticos para VESS = 3, sendo este medidor da qualidade estrutural do solo, um método on-farm e fácil de manusear, sendo utilizado para monitoramento da estrutura do solo em canaviais no Brasil. Nossa avaliação de VESS obteve que as áreas apresentaram superiores e muito próximo do limite (escores = 3), sugerindo através destes resultados que a que as atuais práticas de manejo empregadas e das culturas utilizadas na produção de cana-de-açúcar estão proporcionando efeitos degradantes para qualidade estrutural do solo, desenvolvimento radicular e produtividade, sugerindo novas práticas de manejo para intervir e aliviar a compactação do solo.

Estes resultados encontrados no nosso estudo, corroboram com os resultados encontrados por outros pesquisadores sobre os efeitos deletérios da compactação em canaviais (Souza et al., 2014; Cherubin et al., 2017). De acordo com Cherubin et al. (2016), a baixa qualidade estrutural dos canaviais está associada as operações de preparo do solo, replantio da

cana-de-açúcar e ao tráfego intenso de máquinas em condição favorável para a compactação do solo, implicando em um menor volume de solo explorado pelas raízes.

Portanto, as informações revelam que a compactação do solo estava presente no solo, através de valores de GC (Fig. 13,14 e 15) acima do limite crítico, conforme abordado por Suzuki et al. (2013) e Naderi-Boldaji & Keller (2016), valores acima grau de compactação crítico implicam na baixa aeração (MaP) ($<10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), resistência do solo a penetração acima de 2 MPa, restringe o crescimento radicular, aumenta a densidade do solo e redução da produtividade das plantas. Além da redução no conteúdo de água do solo (Roodposhti et al., 2019).

Portanto, as informações revelam que a compactação do solo estava presente no solo, através de valores elevados de GC, Ds, RP do solo e VESS, e valores abaixo do limite crítico como MaP. Estes dados quantitativos podem concluir para todos as áreas estudados já se apresentavam em algum grau de compactação. Resultados dos preparos realizados nas áreas de cana-de-açúcar, sob plantio convencional seguidos pela mecanização intensiva e pesada durante o cultivo da cana-de-açúcar.

A má qualidade física do solo pode ficar evidente, sendo frequente em canaviais devido ao processo de recompactação do solo, pois o preparo mecânico do solo proporciona redução dos valores de Ds e RP do solo inicialmente, porém após sucessivas operações ao longo da safra impactam negativamente nos indicativos físicos do solo, assim, o solo recompacta (Guimarães et al., 2011; Cherubin et al., 2016; Barbosa et al., 2019; Júnnyor et al., 2019; Cavalcanti et al., 2020), independente da textura, ou anos de cultivo, a compactação do solo em canaviais é um problema recorrente, atingindo limites críticos para o crescimento radicular, aeração e fluxo de água nos primeiros anos de cultivo.

3.5. Conclusão

O sensor de indução eletromagnética com base na leitura de CEa do solo discriminou regiões de compactação contrastantes, porém estas variações não foram confirmadas por medições tradicionais da física do solo. A ausência de variação significativas no estado de compactação do solo entre as regiões definidas pelo sensor de CEa também foi confirmada pelos indicadores tradicionais físicos de campo (VESS e resistência a penetração) e de laboratório (densidade do solo, grau de compactação, macro- e microporosidade e resistência a penetração).

Todas as áreas apresentavam elevado grau de compactação, portanto, encoraja-se novos estudos em condições de estado de compactação contrastante para confirmar ou não os

achados nesse estudo. Finalmente, também se recomenda novo estudo sob condições de estados de compactação controladas para se obter melhores respostas do EMI de CEa, estudando fatores adicionais que influenciam nas alterações de CEa do solo (e.g., umidade do solo; cobertura do solo; mineralogia, dentre outros).

Referências

- Adamchuk, V. I., Rossel, R. A. V., Marx, D. B., & Samal, A. K. (2011). Using targeted sampling to process multivariate soil sensing data. *Geoderma*, 163(1-2), 63-73.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A., & Dexter, A. R. (2010). Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and soil*, 335(1), 229-244.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A., & Dexter, A. R. (2011). Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, 166(1), 34-42.
- Ball, B. C., Batey, T., & Munkholm, L. J. (2007). Field assessment of soil structural quality—a development of the Peerlkamp test. *Soil use and Management*, 23(4), 329-337.
- Barbosa, L. C., Magalhães, P. S. G., Bordonal, R. O., Cherubin, M. R., Castioni, G. A. F., Tenelli, S., ... & Carvalho, J. L. N. (2019). Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. *Soil and Tillage Research*, 195, 104383.
- Barbosa, L.C., Souza, Z.M.D., Franco, H.C.J., Otto, R., Rossi Neto, J., Garside, A.L., Carvalho, J.L.N., 2018. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional* 13, 15–25. doi:10.1016/j.geodrs.2018.03.002.
- Beckett, C. T. S., Bewsher, S., Guzzomi, A. L., Lehane, B. M., Fourie, A. B., & Riethmuller, G. (2018). Evaluation of the dynamic cone penetrometer to detect compaction in ripped soils. *Soil and Tillage Research*, 175, 150-157.
- Bertermann, D., & Schwarz, H. (2017). Laboratory device to analyse the impact of soil properties on electrical and thermal conductivity. *International Agrophysics*, 31(2), 157.
- Besson, A., Séger, M., Giot, G., & Cousin, I. (2013). Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring. *Geoderma*, 204, 130– 139.

- Blanchy, G., Saneiyan, S., Boyd, J., McLachlan, P., & Binley, A. (2020). ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/modeling. *Computers & Geosciences*, 137, 104423.
- Bottinelli, N., Zhou, H., Boivin, P., Zhang, Z. B., Jouquet, P., Hartmann, C., & Peng, X. (2016). Macropores generated during shrinkage in two paddy soils using X-ray micro-computed tomography. *Geoderma*, 265, 78-86.
- Bluett, C., Tullberg, J. N., McPhee, J. E., & Antille, D. L. (2019). Soil and Tillage Research: Why still focus on soil compaction? *Soil and Tillage Research*, 194, 1-2.
- Brevik, E. C., Fenton, T. E., & Lazari, A. (2006). Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. *Precision Agriculture*, 7(6), 393-404.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., ... & Brussaard, L. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., Melone, F., & Moramarco, T. (2012). Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *Journal of Hydrology*, 454, 101-112.
- Calamita, G., Perrone, A., Brocca, L., Onorati, B., & Manfreda, S. (2015). Field test of a multi-frequency electromagnetic induction sensor for soil moisture monitoring in southern Italy test sites. *Journal of Hydrology*, 529, 316-329.
- Calamita, G., Perrone, A., Brocca, L., & Straface, S. (2017). Soil electrical resistivity for spatial sampling design, prediction, and uncertainty modeling of soil moisture. *Vadose Zone Journal*, 16(10), 1-14.
- Carvalho, J. L. N., Nogueirol, R. C., Menandro, L. M. S., Bordonal, R. D. O., Borges, C. D., Cantarella, H., & Franco, H. C. J. (2017). Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *Gcb Bioenergy*, 9(7), 1181-1195.
- Castioni, G.A., Cherubin, M.R., Menandro, L.M.S., Sanches, G.M., Bordonal, R.D.O., Barbosa, L.C., Franco, H.C.J., Carvalho, J.L.N., 2018. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. *Soil and Tillage Research* 184, 301–309. doi:10.1016/j.still.2018.08.007.
- Castioni, G. A., de Lima, R. P., Cherubin, M. R., Bordonal, R. O., Rolim, M. M., & Carvalho, J. L. (2021). Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: Stress transmitted and soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 213, 105122.

- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M., & Cherubin, M. R. (2020). Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. *Geoderma*, 370, 114353.
- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M., & Gomes, I. F. (2019). Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 189, 140-147.
- Chen, G., Weil, R. R., & Hill, R. L. (2014). Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, 136, 61-69.
- Cherubin, M. R., Franco, A. L., Guimarães, R. M., Tormena, C. A., Cerri, C. E., Karlen, D. L., & Cerri, C. C. (2017). Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). *Soil and Tillage Research*, 173, 64-74.
- Cherubin, M.R., Chavarro-Bermeo, J.P., Silva-Olaya, A.M., 2019. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agroforestry Systems* 93, 1741–1753. doi:10.1007/s10457-018-0282-y.
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franco, A. L., Tormena, C. A., Cerri, C. E., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, 267, 156-168.
- Cherubin, M. R., Oliveira, D. M. D. S., Feigl, B. J., Pimentel, L. G., Lisboa, I. P., Gmach, M. R., ... & Cerri, C. C. (2018). Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. *Scientia Agricola*, 75, 255-272.
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2003). Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy journal*, 95(3), 455-471.
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1-3), 11-43.
- Corwin, D. L., & Scudiero, E. (2020). Field-scale apparent soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1405-1441.
- Day-Lewis, F. D., Linde, N., Haggerty, R., Singha, K., & Briggs, M. A. (2017). Pore network modeling of the electrical signature of solute transport in dual-domain media. *Geophysical Research Letters*, 44, 4908– 4916.
- de Lima, R. P., da Silva, A. P., Giarola, N. F., da Silva, A. R., & Rolim, M. M. (2017). Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems engineering*, 162, 1-10.

- De Moraes, M. T., Bengough, A. G., Debiassi, H., Franchini, J. C., Levien, R., Schnepf, A., & Leitner, D. (2018). Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. *Plant and soil*, 428(1), 67-92.
- Doolittle, J. A., & Brevik, E. C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223, 33-45.
- Esteban, D. A. A., de Souza, Z. M., Tormena, C. A., Lovera, L. H., de Souza Lima, E., de Oliveira, I. N., & de Paula Ribeiro, N. (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil and Tillage Research*, 187, 60-71.
- Franco, A. L., Cherubin, M. R., Cerri, C. E., Guimarães, R. M., & Cerri, C. C. (2017). Relating the visual soil structure status and the abundance of soil engineering invertebrates across land use change. *Soil and Tillage Research*, 173, 49-52.
- Galambošová, J., Macák, M., Rataj, V., Barát, M., & Misiewicz, P. A. (2020). Determining trafficked areas using soil electrical conductivity—a pilot study. *Acta Technologica Agriculturae*, 23(1), 1-6.
- Garré, S., Hyndman, D., Mary, B., & Werban, U. (2021). Geophysics conquering new territories: The rise of “agrogeophysics”. *Vadose Zone Journal*, 20(4), e20115.
- Groenevelt, P. H., Grant, C. D., & Semetsa, S. (2001). A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research*, 39(3), 577-598.
- Guimarães RML, Neves Junior AF, Silva WG, Rogers CD, Ball BC, Montes CR, Pereira BFF. The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. *Soil and Tillage Research*. 2017; 173 75-82.
- Guimarães, R. M. L., Ball, B. C., & Tormena, C. A. (2011). Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, 27(3), 395-403.
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121– 145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.
- Horn, R. A. I. N. E. R., Way, T., & Rostek, J. E. N. S. (2003). Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil and Tillage Research*, 73(1-2), 101-106.

- Horn, R., Domżzał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A., & Van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35(1-2), 23-36.
- Horn, R., Holthusen, D., Dörner, J., Mordhorst, A., & Fleige, H. (2019). Scale-dependent soil strengthening processes—what do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil and Tillage Research*, 195, 104388.
- Imhoff, S., Kay, B. D., Da Silva, A. P., & Hajabbasi, M. A. (2010). Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 303-310.
- Jimenez, K. J., Rolim, M. M., Gomes, I. F., de Lima, R. P., Berrio, L. L. A., & Ortiz, P. F. (2021). Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, 206, 104847.
- Júnnyor, W. D. S. G., Diserens, E., De Maria, I. C., Araujo-Junior, C. F., Farhate, C. V. V., & de Souza, Z. M. (2019). Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Science of the total environment*, 681, 424-434.
- Keller, T., Arvidsson, J., & Dexter, A. R. (2007). Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2), 45-52.
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Manalili, M. P., Rek, J., Stadelmann, V., ... & Or, D. (2017). Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure. *Vadose Zone Journal*, 16(4), 1-16.
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Schymanski, S. J., Weisskopf, P., Koestel, J., ... & Or, D. (2021). Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 85(4), 1002-1020.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194, 104293.
- Kotlar, A. M., van Lier, Q. D. J., Andersen, H. E., Nørgaard, T., & Iversen, B. V. (2020). Quantification of macropore flow in Danish soils using near-saturated hydraulic properties. *Geoderma*, 375, 114479.

- Keller, T., Lamandé, M., Naderi-Boldaji, M., & Lima, R. P. D. (2022). Soil compaction due to agricultural field traffic: An overview of current knowledge and techniques for compaction quantification and mapping. *Advances in Understanding Soil Degradation*, 287-312.
- Kühn, J., Brenning, A., Wehrhan, M., Koszinski, S., Sommer, M., 2009. Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. *Precision Agriculture* 10, 490–507. doi:10.1007/s11119-008-9103-z.
- Longepierre, M., Widmer, F., Keller, T., Weisskopf, P., Colombi, T., Six, J., & Hartmann, M. (2021). Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management. *ISME Communications*, 1(1), 1-13.
- Lozano, N., Rolim, M. M., Oliveira, V. S., Tavares, U. E., & Pedrosa, E. M. R. (2013). Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, 129, 61-68.
- Martínez, G., Laguna, A. M., Giráldez, J. V., & Vanderlinden, K. (2021). Concurrent variability of soil moisture and apparent electrical conductivity in the proximity of olive trees. *Agricultural Water Management*, 245, 106652.
- Martinez, G., Pachepsky, Y. A., Vanderlinden, K., & Giraldez, J. V. (2011, December). Estimating spatial variations in water content of clay soils from time-lapse electrical conductivity surveys. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2011, pp. H42F-05).
- Martínez, G., Vanderlinden, K., Giráldez, J. V., Espejo, A. J., & Muriel, J. L. (2010). Field-scale soil moisture pattern mapping using electromagnetic induction. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 871-881.
- Martinez, G., Vanderlinden, K., Ordóñez, R., & Muriel, J. L. (2009). Can apparent electrical conductivity improve the spatial characterization of soil organic carbon?. *Vadose Zone Journal*, 8(3), 586-593.
- de Melo, L. B. B., Silva, B. M., Peixoto, D. S., Chiarini, T. P. A., de Oliveira, G. C., & Curi, N. (2021). Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 208, 104876.
- Molin, J. P., & Castro, C. N. D. (2008). Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. *Scientia Agricola*, 65, 567-573.
- Moraes, M. T. D., Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J. C., & Silva, V. R. D. (2014). Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(1), 288-298.

- Moraes, M. T. D., Levien, R., Trein, C. R., Bonetti, J. D. A., & Debiasi, H. (2018). Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53, 464-477.
- Moysey, S. M., & Liu, Z. (2012). Can the onset of macropore flow be detected using electrical resistivity measurements? *Soil Science Society of America Journal*, 76(1), 10-17.
- Naderi-Boldaji, M., & Keller, T. (2016). Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. *Soil and Tillage Research*, 159, 41-46.
- Oliveira, V. S., Rolim, M. M., Costa, Y. D., Pedrosa, E. M., & Silva, Ê. F. D. F. (2011). Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15, 435-442.
- Otto, R., Castro, S. A. Q., Mariano, E., Castro, S. G. Q., Franco, H. C. J., & Trivelin, P. C. O. (2016). Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next?. *Bioenergy Research*, 9(4), 1272-1289.
- Pardo-Igúzquiza, E., & Dowd, P. A. (2013). Comparison of inference methods for estimating semivariogram model parameters and their uncertainty: The case of small data sets. *Computers & Geosciences*, 50, 154-164.
- Peixoto, D. S., Silva, B. M., Godinho Silva, S. H., Karlen, D. L., Moreira, S. G., Pereira da Silva, A. A., ... & Curi, N. (2019). Diagnosing, Ameliorating, and Monitoring Soil Compaction in No-Till Brazilian Soils. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2(1), 1-14.
- Pentoś, K., Pieczarka, K., & Serwata, K. (2021). The Relationship between Soil Electrical Parameters and Compaction of Sandy Clay Loam Soil. *Agriculture*, 11(2), 114.
- Pusch, M., Oliveira, A. L., Fontenelli, J. V., & Amaral, L. R. D. (2021). SOIL PROPERTIES MAPPING USING PROXIMAL AND REMOTE SENSING AS COVARIATE. *Engenharia Agrícola*, 41, 634-642.
- Reedy, R. C., & Scanlon, B. R. (2003). Soil water content monitoring using electromagnetic induction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(11), 1028-1039.
- Reichert, J. M., Mentges, M. I., Rodrigues, M. F., Cavalli, J. P., Awe, G. O., & Mentges, L. R. (2018). Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. *Catena*, 165, 345-357.
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102(2), 242-254.

- Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tan, C. S., & Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110(1-2), 131-146.
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J. F., Bruand, A., & Guéris, J. (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52(1), 49-58.
- Rhoades, J. D., & van Schilfgaarde, J. (1976). An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Science Society of America Journal*, 40(5), 647-651.
- Romero-Ruiz, A., Linde, N., Baron, L., Breitenstein, D., Keller, T., Or, D., 2022. Lasting Effects of Soil Compaction on Soil Water Regime Confirmed by Geoelectrical Monitoring. *Water Resources Research* 58. doi:10.1029/2021wr030696.
- Romero-Ruiz, A., Linde, N., Baron, L., Solazzi, S.G., Keller, T., Or, D., 2021. Seismic signatures reveal persistence of soil compaction. *Vadose Zone Journal* 20. doi:10.1002/vzj2.20140.
- Romero-Ruiz, A., Linde, N., Keller, T., Or, D., 2018. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. *Reviews of Geophysics* 56, 672–697. doi:10.1029/2018rg000611
- Rossetti, K. D. V., & Centurion, J. F. (2013). Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 472-479.
- Roodposhti, H. R., Hafizi, M. K., Kermani, M. R. S., & Nik, M. R. G. (2019). Electrical resistivity method for water content and compaction evaluation, a laboratory test on construction material. *Journal of Applied Geophysics*, 168, 49-58.
- Sanches, G. M., Magalhães, P. S., Remacre, A. Z., & Franco, H. C. (2018). Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. *Soil and Tillage Research*, 175, 217-225.
- Sanches, GM, Magalhães, PSG, & Franco, HCJ (2019). Avaliação local-específica da variabilidade espacial e temporal da produtividade da cana-de-açúcar relacionada aos atributos do solo. *Geoderma*, 334, 90-98.
- Sanches, GM, Magalhães, PSG, dos Santos Luciano, AC, Camargo, LA, & Franco, HC (2020). Avaliação abrangente da variabilidade espacial do solo relacionada a parâmetros topográficos em canaviais. *Geoderma*, 362, 114012.
- Seladji, S., Cosenza, P., Tabbagh, A., Ranger, J., & Richard, G. (2010). The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation. *European Journal of Soil Science*, 61(6), 1043-1055.

- Shaukat, H., Flower, K. C., & Leopold, M. (2022). Quasi-3D mapping of soil moisture in agricultural fields using electrical conductivity sensing. *Agricultural Water Management*, 259, 107246.
- Simon, C. D. P., Gomes, T. F., Pessoa, T. N., Soltangheisi, A., Bieluczyk, W., Camargo, P. B. D., ... & Cherubin, M. R. (2022). Soil quality literature in Brazil: A systematic review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46.
- Sithole, N. J., Magwaza, L. S., & Mafongoya, P. L. (2016). Conservation agriculture and its impact on soil quality and maize yield: A South African perspective. *Soil and Tillage Research*, 162, 55-67.
- Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., ... & Pugh, T. A. (2016). Global change pressures on soils from land use and management. *Global change biology*, 22(3), 1008-1028.
- Souza, G. S. D., Souza, Z. M. D., Silva, R. B. D., Barbosa, R. S., & Araújo, F. S. (2014). Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(1), 135-146.
- Souza, GSD, Souza, ZMD, Silva, RBD, Barbosa, RS, & Araújo, FS (2014). Efeitos do controle de tráfego na qualidade física do solo e no cultivo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38 (1), 135-146.
- Sudduth, K. A., Hummel, J. W., & Drummond, S. T. (2004). Comparison of the Veris Profiler 3000 to an ASAE-standard penetrometer. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(5), 535.
- Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., ... & Thelen, K. D. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1-3), 263-283.
- Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Myers, D. B., & Drummond, S. T. (2010). Mapping depth to argillic soil horizons using apparent electrical conductivity. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 15(3), 135-146.
- Suzuki, L. E. A. S., Reichert, J. M., & Reinert, D. J. (2013). Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. *Soil research*, 51(4), 311-321.
- Tavares Filho, J., Feltran, C. T. M., Oliveira, J. F. D., & Almeida, E. D. (2012). Modelling of soil penetration resistance for an Oxisol under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 89-95.
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo*.

Vaz, C. M., Manieri, J. M., De Maria, I. C., & Tuller, M. (2011). Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, 166(1), 92-101.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compactação do solo e a susceptibilidade do solo a compactação em áreas de cana-de-açúcar foram evidenciadas neste trabalho. Esta degradação da qualidade física do solo foi associada ao tráfego descontrolado, principalmente em umidades críticas para máxima compactação, independente dos teores de argila e ciclo da cultura nas áreas deste estudo. Entretanto, diagnosticar a compactação continua sendo um desafio, principalmente em áreas de cana-de-açúcar.

Desta forma, os métodos tradicionais já empregados nos fornecem uma série de dados importantes para diagnóstico da compactação do solo através dos limites críticos dos atributos. No entanto, a utilização de metodologias como o ensaio de Proctor normal para determinação da densidade do solo máxima e conseqüentemente o grau de compactação pode fornecer informações subestimadas para determinação de limites críticos em canaviais. Entretanto, se busca formas mais automatizadas, novas metodologias como a condutividade elétrica do solo (CEa) através de sensor de indução eletromagnética (EMI) para atender esta demanda. Porém, a utilização da CEa está associada com uma série de fatores que influenciam os resultados, se tornando ineficaz para definir estados de compactação. Portanto, novos estudos são necessários nesta área, buscando isolar fatores adjacentes a qualidade física do solo, em ambiente controlado e que possibilite a obter respostas diante de todos os fatores.

Para todas as áreas avaliadas a compactação estava presente, com efeitos deletérios na estrutura do solo. Visando a melhoria da qualidade do solo, devemos atenuar os efeitos do processo da compactação nos canaviais pelo uso de práticas inadequadas. Como estratégias para aliviar o processo de compactação algumas práticas de manejo são recomendadas, como por exemplo, adoção do sistema plantio direto, rotação de cultura, tráfego controlado deixando zonas livre de tráfego próximo a linha de cultivo, com ajustes de bitola além da manutenção da palha no solo, e essencialmente evitar o tráfego no solo em condições de umidade próximo a umidade crítica para máxima compactação.