



**SABRINA DE FÁTIMA PAULO**

**RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO E DENSIDADE MÁXIMA EM  
LATOSSOLO EM DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO**

**LAVRAS – MG  
2022**

**SABRINA DE FÁTIMA PAULO**

**RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO E DENSIDADE MÁXIMA EM LATOSSOLO EM  
DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Graduação em Engenharia  
Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de  
Bacharel.

Prof. Dr. JUNIOR CESAR AVANZI  
Orientador

JOSIEL DE JESUS SANTOS  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2022**

**SABRINA DE FÁTIMA PAULO**

**RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO E DENSIDADE MÁXIMA EM LATOSSOLO EM  
DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO**

**RESISTANCE TO PENETRATION AND MAXIMUM DENSITY IN LATOSOL AT  
DIFFERENT LEVELS OF COMPACTION**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 15 de setembro de 2022

Dr. Junior Cesar Avanzi	UFLA
Dr. Bruno Montoani Silva	UFLA
Msc. Gilmar Gonçalves de Oliveira	UFLA
Josiel de Jesus Santos	UFLA

Prof. Dr. JUNIOR CESAR AVANZI  
Orientador

JOSIEL DE JESUS SANTOS  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2022**

*A Deus por ter realizado este sonho, aos meus pais Márcio Silva Paulo e Waldilene Fátima Tomás Paulo, pelo imenso amor e por não terem medido esforços para possibilitar que eu chegasse até aqui, as minhas irmãs Sthéfany e Paola pelo apoio e carinho.  
A minha avó Maria de Fátima pelos ensinamentos e cuidado.  
Dedico*

## AGRADECIMENTOS

O ato de agradecer quando sincero é a expressão mais sublime para demonstrar reconhecimento, gratidão e a importância de alguém ou de algo, então com reverência e humildade externalizo meus mais sinceros sentimentos de gratidão, primeiramente a Deus pela vida, pelo zelo e amor constante, pela realização deste sonho e o auxílio na superação de cada obstáculo.

Aos meus pais, que escolheram sonhar comigo este sonho e incansavelmente me apoiaram não me permitindo desanimar, e por sempre demonstrarem sua confiança em minha capacidade para concluir esta etapa.

As minhas irmãs e avó, que sempre me compreenderam nos dias de angústia e aflição diante dos estudos, e ao seu modo me fizeram sorrir e persistir.

Aos meus tios Wander, Marcelo, Magno e Gabriel (*in memoriam*) que acreditaram em mim e me proporcionaram palavras de apoio e carinho.

Aos meus avós (*in memoriam*) Odete Marta e José Vicente, que me deixaram ensinamentos que forjaram o meu caráter, me conduzindo em um caminho de honestidade, ética e moral.

A Universidade Federal Lavras – UFLA por todas as oportunidades de conhecimento e experiências proporcionadas.

A todos os professores que ao longo desses anos contribuíram para minha formação profissional, compartilhando seus conhecimentos e experiências. Carinhosamente agradeço ao Prof. Janderson Rodrigo de Oliveira, que me inspirou a persistir nesta jornada e me motivou a superar e aprender com os desafios e ao Prof. Bruno Montoani, por me inspirar com sua paixão pela área dos solos.

Agradeço especialmente ao meu orientador Prof. Junior Cesar Avanzi, por ter me acolhido com leveza e carinho, pela disposição e orientação com extrema paciência e dedicação em cada etapa deste trabalho.

Aos técnicos Doroteo de Abreu e José Roberto Fernandes pela disposição em me auxiliar nos procedimentos, pela orientação e palavras de ânimo.

Ao meu coorientador Josiel Santos e ao Gilmar, pelo auxílio e apoio em cada etapa na construção deste, pela paciência e carinho a cada momento de estresse.

Agradeço aos ministros do evangelho Pastor André Fernandes, Evangelista Jeremias Pereira e Bispo Bruno Leonardo pelas palavras de orientação e fé que me fortaleceram para não desistir.

Agradeço em especial aos meus amados amigos Wanderleia, Izadora e Fernando pelo carinho e atenção a mim todos os dias dedicados.

E aos demais amigos que tornaram meus dias ao longo destes anos mais leves, cada momento desta parte da minha história foi marcado por vocês, Joyce Christina, Otávio Oliveira, Wesley Naves, Maria Eduarda Ferreira, Gabriel Fernandes, Marcos Vinícios, Natália Campim, Mariana Miranda, Caíque de Souza e Mírian Isabel.

## RESUMO

A compactação dos solos agrícolas devido ao aumento da mecanização tornou-se um fator limitante no crescimento e desenvolvimento das culturas. Assim, o propósito deste trabalho foi avaliar a influência de diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico cultivado sob Sistema de Plantio Direto, na resistência do solo à penetração e identificar as camadas restritivas ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas. O estudo foi realizado na fazenda Experimental da Universidade Federal de Lavras (UFLA) na cidade de Lavras, MG. O delineamento foi instalado em condições de sequeiro e irrigado, disposto em blocos em esquema fatorial 3x2, com duas repetições. Os tratamentos consistiram em estados de compactação induzida, como segue: SCA - sem compactação adicional; com compactação adicional pela circulação de trator em seis (CA6) e doze etapas (CA12). A camada superficial foi a mais afetada pela compactação induzida, no entanto constatou-se que houve um aumento gradativo de RP nas camadas subjacentes para todos os tratamentos.

**Palavras-chave:** Mecanização agrícola. Compactação. Resistência à penetração. Densidade do solo.

## ABSTRACT

Compaction of agricultural soils due to increased mechanization has become a limiting factor in crop growth and development. Thus, the purpose of this work was to evaluate the influence of different levels of compaction in a typical Dystrophic Red Yellow Latosol cultivated under no-tillage system, on soil penetration resistance and to identify the restrictive layers to plant root system development. The study was carried out at the Experimental farm of the Federal University of Lavras (UFLA) in the city of Lavras, MG. The design was installed under rainfed and irrigated conditions, arranged in blocks in a 3x2 factorial scheme, with two replications. The treatments consisted of induced compaction states, as follows: SCA - no additional compaction; with additional compaction by tractor circulation in six (CA6) and twelve stages (CA12). The surface layer was the most affected by the induced compaction, however it was found that there was a gradual increase in RP in the underlying layers for all treatments.

**Keywords:** Agricultural mechanization. Compaction. Penetration resistance. Soil density.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Crescimento territorial em hectares do sistema de plantio direto no Brasil entre os períodos de 1972 a 2018.....	18
Figura 2 – Área em que o experimento está localizado.....	28
Figura 3 – Áreas de realização do experimento. ....	29
Figura 4 – Densidade do solo ( $D_s$ ) em função da umidade gravimétrica ( $U$ ) obtida através do ensaio de normal Proctor para um Latossolo.....	32
Figura 5 – Resistência à penetração ao longo do perfil do solo área irrigada. ....	35
Figura 6 – Resistência à penetração ao longo do perfil do solo área de sequeiro. ....	36



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de densidade máxima do solo ( $D_s$ ) e a umidade ótima de compactação ( $U_g$ ), sob diferentes profundidades, em área de sequeiro e irrigado.....	32
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Solo e seus processos de formação .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2</b>	<b>Atributos do solo.....</b>	<b>14</b>
<b>3.3</b>	<b>Sistemas de preparo do solo.....</b>	<b>17</b>
<b>3.4</b>	<b>Compactação do solo.....</b>	<b>19</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Ensaio de compactação tipo Proctor Normal.....</b>	<b>22</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Resistência do solo à penetração .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5</b>	<b>Erosão do solo .....</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização da área experimental.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2</b>	<b>Sistemas de manejo do solo.....</b>	<b>29</b>
<b>4.3</b>	<b>Avaliação das propriedades físicas do solo .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Ensaio normal de proctor .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Resistência à penetração .....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS DADOS .....</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>
	<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>48</b>
	<b>APÊNDICE 2 .....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dentro do desenvolvimento da agricultura um dos principais anseios é auferir aumento na produtividade, com melhor qualidade, e ao mesmo tempo haver preservação dos recursos ambientais por intermédio de técnicas e tecnologias. Para tal, foi necessário o aprimoramento dos sistemas agrícolas em busca de um sistema que fosse eficiente e conservacionista, especialmente quando relacionado ao solo e à água (MÜLLER *et al.*, 2021).

Dos diferentes tipos de preparo do solo, o Sistema de Plantio Direto (SPD) apresenta determinados benefícios em relação aos demais métodos de cultivo, sendo considerado uma excelente escolha para obtenção do equilíbrio entre o manejo sustentável dos recursos naturais e melhor produtividade (PICCIN; AMADO; FIORIN, 2020).

Apesar dos benefícios proporcionados pelo SPD, essa técnica de plantio está regularmente relacionado ao intenso tráfego de máquinas para os tratos culturais, o que contribui com a alteração das propriedades físicas do solo, ocasionando diversos problemas, como a compactação do solo, que influencia na ocorrência de outros processos e perdas (BERGAMIN *et al.*, 2010), e causam declínio na qualidade e produtividade do solo (PANAGOS *et al.*, 2017).

A compactação do solo tem sido estudada nos últimos anos pelos efeitos negativos, tanto no solo quanto na produtividade das culturas. A suscetibilidade do solo em ser compactado tem sido analisada como uma junção de vários fatores, sendo eles: as propriedades físicas do solo e seu estado hídrico, a rotação de culturas, a rodagem, o número de passagens e práticas agrícolas, e o tamanho da máquina (SHAH *et al.*, 2017).

O aumento da compactação causam efeitos adversos nas culturas, e mesmo que haja uma distinção comportamental em cada cultura diante de tal situação, comumente, ocorrerá alteração estrutural do solo –em razão do novo arranjo das partículas e dos agregados que serão formado–, aumento da densidade e da resistência do solo à penetração, e redução da macroporosidade (SALES *et al.*, 2016; PEIXOTO *et al.*, 2019), limitando a infiltração e armazenamento de água e nutrientes no solo, reduzindo a quantidade de oxigênio presente (LILLY *et al.*, 2018), que, por sua vez, inibe o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (BERGAMIN *et al.*, 2010).

Quanto mais compactado o solo, maior será sua resistência oferecida ao crescimento de raízes e mais limitado o crescimento vegetal. Há divergências na literatura quanto ao valor crítico

de RP para o crescimento radicular, uma vez que sua variação depende da cultura que está sendo analisada (CUNHA; CASCÃO; REIS, 2009), mas em geral, Reinert et al. (2008) consideraram que 2,0 a 3,0 Mpa, representa a faixa crítica de resistência do solo com redução importante no crescimento radicular. Para esses autores, o crescimento radicular em solos compactados está relacionado com sua densidade, porém para cada classe textural há uma densidade crítica, que pode levar à redução ou ao impedimento do crescimento de raízes devido a resistência do solo à penetração (REINERT *et al.*, 2008).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar as propriedades físicas do solo em áreas com graus crescentes de compactação em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico argiloso cultivado sob Sistema de Plantio Direto.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Conhecer a densidade máxima do solo, por meio do ensaio de compactação tipo Proctor Normal, em cultivo irrigado e sequeiro.
- Usar a resistência do solo à penetração para avaliar o efeito de diferentes níveis de compactação e identificar a camada mais restritiva ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 Solo e seus processos de formação**

A definição de solo apresenta diversos sentidos correspondentes à perspectiva do seu uso ou análise a ser realizada. Segundo a Embrapa (2020), do ponto de vista da pedologia, o solo é um conjunto de corpos naturais, composto por partes sólidas, líquidas e gasosas, formados por materiais minerais e orgânicos.

A NBR 6502/1995 define o solo como “material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica”, ou seja, os

solos são considerados elementos naturais compostos e organizados com certas características morfológicas, devido ao seu processo de formação e material de origem, que envolvem porções superficiais do planeta.

Do ponto de vista da agronomia solo é a parte agriculturável da crosta terrestre (MURRIETA, 2018), ou seja, a camada superficial da terra que é formada por matéria orgânica, microflora e microfauna, podendo ser desenvolvidos cultivos (CORRÊA DA SILVA, 2014), sendo a principal essência para a produção de alimentos (TESTONI *et al.*, 2021).

De forma mais clara e objetiva, pode-se definir o solo como um material formado por partículas sólidas com frações minerais e orgânicas que são depositadas sucessivamente em camadas na superfície terrestre formando pequenos espaçamentos, denominados de poros, que podem estar parcial ou totalmente preenchidos por água. Sendo assim, o solo é um sistema disperso formado pelas fases líquida, sólida e gasosa, tendo como composição básica areia, silte, argila e geralmente matéria orgânica (CAPUTO *et al.*, 2015).

Vale salientar que o solo não é apenas um material inerte, mas sim um sistema complexo e dinâmico, onde fatores físicos, químicos e biológicos interagem ininterruptamente. As propriedades físicas e químicas que constituem, influenciam nos processos que envolvem os micros e macrorganismos (STAMFORD *et al.*, 2005).

Conforme Suguio (2003) e Pelinson *et al.* (2021), a formação dos solos é resultante do processo de intemperismos das rochas, compondo um o conjunto de processos naturais de transformação físico-química que provocam alterações nas rochas próximas à superfície, dando origem a novos produtos e apresentando harmonia com as novas condições externas. Essa transformação ocorre por meio dos processos físicos, químicos e biológicos, composto pela desagregação descrita como intemperismo físico e pela decomposição que é o intemperismo químico.

O desempenho e efetividade do processo de intemperismo depende das condições climáticas, variáveis locais e propriedades específicas do material, sendo assim, o modo e o tempo de ocorrência será variado, e a junção destas condições irá determinar a predominância de qual tipo de intemperismo ocorrerá (SUGUIO, 2003; SODRÉ, 2012).

Independentemente do tipo de rochas e das características climáticas da região onde estão localizadas, pode-se afirmar que elas sofreram desagregação e/ou decomposição, pois fatores como clima, vegetação, relevo e tempo afetam diretamente os processos de intemperismo.

Consequentemente, diferentes tipos de solo serão formados, além da diversificação nas características de seus horizontes devido a composição química das rochas e de sua pedogênese (FINKLER, 2018; BERTOLLO *et al.*, 2021).

Após o intemperismo a rocha fica mais propensa e vulnerável à erosão e ao transporte das partículas de solo (BERTOLLO *et al.*, 2019), sendo este um processo de remoção e transporte das partículas oriundas da ação do intemperismo por meio de agentes geológicos como o mar, rio, chuva, vento, gelo e gravidade, para diferentes distâncias (SILVA REIMÃO, 2008; BERTOLLO *et al.*, 2021).

Pelinson *et al.* (2021) descreve que, devido a erosão, os solos podem ser separados em dois grandes grupos, sendo eles, os sedimentares que são aqueles transportados pelo processo de erosão e os residuais que são os não transportados, ou seja, que permanecem no local da rocha de origem. Quanto aos tipos de processos erosivos, estes podem ser classificados tanto pelo agente geológico atuante como pela sua intensidade do processo.

### **3.2 Atributos do solo**

As propriedades que caracterizam o tipo de solo, sejam elas físicas, químicas ou biológicas são determinadas pelo processo de formação do solo, o tipo de minerais constituintes e pelas características locais como o clima e relevo, além da microflora e microfauna.

Essas propriedades possibilitam a ocorrência de processos físicos como filtração e lixiviação, enquanto os processos biológicos e químicos em conjunto permitem mecanismos como adsorção, fixação química, precipitação, oxidação e neutralização (CETESB, 2015). Ademais, essas propriedades são relevantes aos estudos sobre o manejo do solo e a probabilidade de sucesso da produção agrônômica.

De acordo com Corrêa da Silva (2014), a porosidade que representa a quantidade de poros tem grande influência na permeabilidade dos solos e na força de arrasto, sendo assim, ela é uma propriedade de extrema importância por auxiliar na determinação do nível de umidade dos solos analisados.

Estes poros presentes nos perfis dos solos, também denominados de volume de espaços vazios, influenciam características temporárias e condicionais do solo em conformidade com padrões temporais e variabilidade de intensidade de chuva local, como por exemplo o nível de

saturação (CAPELLO *et al.*, 2019). Exemplificando mais claramente quanto a classificação da umidade presente no solo, determina-se que um solo é úmido quando os vazios estão preenchidos tanto por ar quanto por água, quando estão totalmente preenchidos com água o solo é denominado como saturado e se preenchidos com ar é classificado como um solo seco (CORRÊA DA SILVA, 2014).

Outra propriedade é a estrutura dos solos, caracterizada pelo formato dos arranjos de partículas constituída de areia, silte, argila e matéria orgânica que dão formas e dimensões aos grãos existentes nos solos, formando assim os agregados (PELINSON *et al.*, 2021). A classificação da estrutura dos solos quanto a seu tipo é identificada a partir desta organização em um arranjo estrutural de agregados nos horizontes dos perfis de solo (CORRÊA DA SILVA, 2014).

Os tipos de estrutura do solo podem ser classificadas quanto à forma (laminar, prismática, blocos e granular), classes e estabilidade que se refere às condições de coesão dos agregados. Esses formatos e a força de adesão das partículas influenciam na distribuição de água, oxigênio e nutrientes pelo perfil do solo, além de facilitar ou dificultar a penetração de raízes tipificando assim qual o solo será mais propenso ao desenvolvimento de determinadas culturas (CORRÊA DA SILVA, 2014).

A coloração é uma importante propriedade morfológica do solo, evidenciando a presença de agentes pigmentadores como matéria orgânica e óxidos de ferro e manganês. A cor também pode ser afetada pela drenagem e alterações na rocha (BERTOLLO *et al.*, 2021). Já a textura, como explicado por Bertollo *et al.* (2021), permite identificar a quantidade e distribuição das frações granulométricas de argila, silte e areia presentes nos horizontes do solo. É importante salientar que, em geral, os solos apresentam diversas combinações destas frações formando solos distintos.

Tanto a coloração quanto a textura são relevantes para o entendimento e identificação de características essenciais relacionadas ao manejo do solo, desenvolvimento de culturas, retenção e movimentação de água, disponibilidade de nutrientes, resistência do solo à penetração, oxigenação e estabilidade de agregados (CORRÊA DA SILVA, 2014).

O potencial hidrogeniônico (pH) pode variar de solo para solo dentro da faixa de 0 a 14, tendo como ponto de neutralidade o pH igual a 7, com isso abaixo deste ponto, o solo é considerado ácido e acima básico (CORRÊA DA SILVA, 2014).

Essa escala numérica adimensional indica a quantidade de íons de hidrogênio ( $H^+$ ) que existe no solo, apresentando indicativos das condições químicas gerais do solo. Por exemplo, solos com baixos valores de pH em geral demonstram pobreza em bases, elevado teor de alumínio, excesso de manganês e deficiência de alguns micronutrientes, já o aumento do pH para valores adequados podem proporcionar melhoria de propriedades físicas do solo (EMBRAPA, 2020).

Ao que se refere a capacidade de troca de cátions (CTC), que representa a quantidade total de cátions retidos à superfície das partículas de solo em condição permutável, pode-se dizer que se a CTC do solo for composta em sua maioria por cátions como  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $K^+$  este solo é nutritivo para plantas, porém se sua constituição majoritária for de cátions potencialmente tóxicos para plantas como  $H^+$  e  $Al^{3+}$  o solo será classificado como um solo pobre (EMBRAPA, 2020).

De acordo com Corrêa da Silva (2014), a matéria orgânica diz respeito a toda substância morta no solo, sejam provenientes de resíduos de animais e/ou vegetais em fase de decomposição, desempenhando o importante papel de melhorar as condições físicas e químicas do solo.

Essa substância natural apresenta praticamente todos os macros e micronutrientes aumentando a fertilidade e a CTC do solo, além de auxiliar na estrutura dos agregados. Em determinadas regiões, dependendo do clima, a quantidade de matéria orgânica presente no solo é uma condicionante fundamental para o equilíbrio dos nutrientes (EMBRAPA, 2020).

Segundo a Embrapa (2020), em referência aos nutrientes do solo, estes são divididos em macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) que são absorvidos pela planta em maior proporção e os micronutrientes (B, Zn, Cu, Fe, Mo, Cl e Mn). Sua disponibilidade no solo está relacionada à presença da matéria orgânica, devido a ciclagem de nutrientes (REIS, 2017) e do manejo adequado, pois alguns podem estar presentes na forma química que impossibilita que as raízes das plantas os absorvam.

O equilíbrio da quantidade de nutrientes presentes no solo é essencial, já que, a ausência ou a baixa concentração de determinada substância pode limitar o crescimento e rendimento produtivo da cultura. Contudo, apenas a presença e equilíbrio dos nutrientes não é suficiente para a efetividade do crescimento e saúde para as plantas, pois devem estar disponíveis na forma em que possam ser absorvidos em proporções balanceadas (MALTA *et al.*, 2019).



### 3.3 Sistemas de preparo do solo

O manejo do solo compõe um sistema com diferentes possibilidades de preparo do solo, com o intuito de desenvolver condições favoráveis à sementeira, ao crescimento e ao desenvolvimento das culturas implantadas (PETRERE; CUNHA, 2010). Como exemplo, podem ser citados os sistemas de plantio convencional, o cultivo mínimo, e o de plantio direto.

Assim como o uso do solo, o manejo deve ter como base o potencial produtivo, sendo então preciso considerar as propriedades física, química e biológica do solo, uma vez que, um bom manejo propõe uma produtividade de qualidade para a atualidade e ao mesmo tempo busca garantir a fertilidade para a produção futura (PETRERE; CUNHA, 2010). O preparo do solo não é um ato definitivo, então em razão do tempo e o uso do solo, recomenda-se que o manejo esteja presente a cada novo cultivo (CORRÊA DA SILVA, 2014).

Por um longo período, a forma dominante de manejo na agricultura foi o preparo convencional (PC), que consiste na aração seguida de gradagens para a remoção dos resíduos da cultura anterior, e o revolvimento do solo para a incorporação dos resíduos remanescentes, causando uma degradação ao solo em uma camada de 0 – 40 cm (JÚNNYOR *et al.*, 2022). O preparo convencional acelera a decomposição da matéria orgânica, causa a quebra dos agregados e reduz sua estabilidade, além disso propicia a ocorrência da compactação do solo (SALES *et al.*, 2016; FAGUNDES, 2019).

Em virtude dos problemas resultantes do PC, como compactação do solo e erosão, buscou-se outros métodos de manejo para minimizar estes impactos e promover a melhoria da estrutura, porosidade, retenção e infiltração de água, adotando-se inicialmente o preparo reduzido também conhecido como cultivo mínimo (BAYER; MIELNICZUK; PAVINATO, 1998). Nesse tipo de manejo busca-se reduzir o revolvimento do solo em comparação ao preparo convencional, por meio da redução do número de operações realizadas e do uso de máquinas agrícolas minimizando assim a compactação do solo (JÚNNYOR *et al.*, 2022).

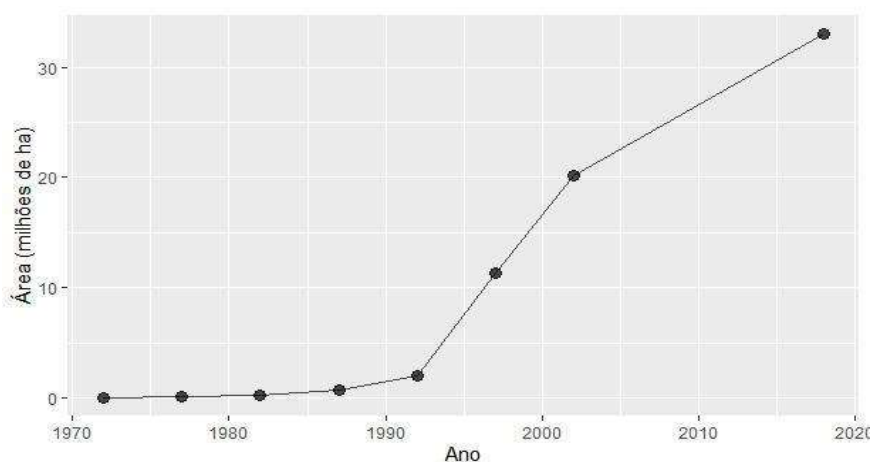
Atualmente, no Brasil as áreas agrícolas têm como predomínio o sistema de plantio direto (SPD). Sendo considerado um sistema conservacionista que se contrapõe ao cultivo tradicional, por dispensar as etapas de aração e gradagem (CORRÊA DA SILVA, 2014; JÚNNYOR *et al.*, 2022).

O Sistema de Plantio Direto foi introduzido no país no início da década de 1970, na região Sul. O intenso preparo do solo pelo PC aliado ao aumento do desmatamento e o potencial erosivo da chuva –característicos dessa região–, causaram um grande impacto erosivo, motivando

pesquisadores e agricultores a buscarem por soluções para mitigar os impactos do manejo inadequado (Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto - FEBRAPDP, 2018).

Após o primeiro plantio neste sistema de manejo em 1972, a expansão do SPD ocorreu em outras áreas do Brasil (FEBRAPDP, 2018). Com o avanço em conhecimento e prática, a quantidade de áreas sob o SPD aumentou ao longo dos anos como representado no gráfico 1.

Figura 1 – Crescimento territorial em hectares do sistema de plantio direto no Brasil entre os períodos de 1972 a 2018



Fonte: adaptado de FEBRAPDP (2019).

O SPD tem por finalidade a conservação do solo e da água, com base em três princípios: ausência de revolvimento do solo, manutenção da cobertura vegetal e rotação de culturas (PICCIN; AMADO; FIORIN, 2020), incluindo também a redução no uso de insumos, máquinas agrícolas e irrigação (PACHECO *et al.*, 2021).

Salomão *et al.* (2020) apontam que um manejo eficiente no SPD possibilita uma redução de até cinco vezes mais na perda de solo quando comparado ao plantio convencional, já que, no SPD, como explicam Sales *et al.*, (2016), a decomposição da matéria orgânica é menor, ocasionando em um acúmulo desse material e o aumento do teor de carbono orgânico que favorece a estabilidade dos agregados do solo pelo efeito cimentante, além de atuar como uma proteção na superfície do solo impedindo sua exposição à agentes geológicos.

Pacheco *et al.* (2021) afirmam que o SPD contribui para a melhoria da estrutura física dos solos, mantendo as características e propriedades como a porosidade, infiltração, capacidade de

retenção, umidade e densidade do solo. Ademais, contribui para o aumento da biodiversidade, controle de ervas daninhas e redução da erosão no solo (OLIVEIRA, 2022).

Quando comparado aos demais tipos de manejo do solo, o SPD apresenta diversos benefícios relacionados à conservação, produtividade e economia, contudo, conforme Sales *et al.* (2016), é possível observar que, mesmo de forma reduzida, é possível identificar compactação na camada superficial do solo e como consequência, a redução da macroporosidade, o aumento da densidade do solo, da resistência à penetração e da erosão.

### **3.4 Compactação do solo**

Conforme Moscôso *et al.* (2021), a compactação do solo é a união forçada das partículas do solo, resultante de uma tensão externa aplicada, ocasionando o aumento da massa específica em consequência da redução do volume poroso devido a expulsão do ar dos macroporos.

Outro processo de alteração do solo, que semelhante à compactação provoca compressão solo é o adensamento, tornando necessário diferenciá-los. Assim como a compactação do solo, o adensamento provoca uma variação volumétrica do solo em razão da redução do volume de vazios, a distinção entre elas é a causa, a compactação do solo como será discutido adiante é originada por ações antrópicas proveniente de meios mecânicos pela aplicação de pressão e manejo inadequado, enquanto o adensamento resulta de ações naturais ou processos pedogenéticos. Entretanto, os seus efeitos são praticamente os mesmos, da perspectiva do uso e manejo agrícola (MACHADO, 2003; MENDES *et al.*, 2007; BARNES, 2016).

A compactação do solo tem potencial de ocorrência em diferentes níveis de profundidades e de maneira desuniforme ao longo do perfil do solo, podendo ser superficial principalmente no sistema de plantio direto e subsuperficial no plantio convencional, em ambos os casos haverá reorganização das partículas de solo dificultando as trocas gasosas e a infiltração de água no solo (MOSCÔSO *et al.*, 2021; RIBEIRO, 2012).

O processo de compactação pode ocorrer por diferentes fontes e causas relacionadas a ações externas e antrópicas no solo, podendo ser citado como exemplos, o pisoteio animal, as obras de engenharia como instalações de dutos, construção de barragens ou construções de empreendimentos residenciais e industriais. Quando relacionado à agricultura, o principal meio de compactação do solo ocorreu com o desenvolvimento e a modernização no sistema agrícola, ao ser incorporado em sua rotina o uso intenso de máquinas e equipamentos durante as fases de

produção, como o plantio e a colheita (SPLIETHOFF *et al.*, 2020; CAPELLO *et al.*, 2019), tornando a compactação do solo um processo cada vez mais comum em detrimento do uso constante desses equipamentos agrícolas (LONGKAI *et al.*, 2021).

Apesar da eficiência e agilidade no processo produtivo, o uso de máquinas no sistema de produção tende a causar uma pressão mecânica no solo que contribui efetivamente para a ocorrência da compactação do solo, tendo efeitos pertinentes nas propriedades do solo, ocasionando, frequentemente, erosão e aumento do escoamento superficial. Torna-se importante salientar, que em condições de solo úmido o risco e as consequências da compactação são ainda mais agravantes (CAPELLO *et al.*, 2019; SPLIETHOFF *et al.*, 2020).

Em muitos casos, a redução produtiva na agricultura em certas regiões não se dá prioritariamente por fatores químicos ou biológicos, mas sim, por fatores físicos como a compactação do solo, resultante da potência e peso das máquinas agrícolas, adicionado ao trânsito constante nas áreas de plantio, principalmente em épocas de maior umidade e com solos expostos ou com escassez de palha como cobertura (ESPESSATO *et al.*, 2017; REINERT *et al.*, 2007).

Cunha *et al.* (2009), contribuíram para a discussão ao demonstrarem que o efeito da compactação ocasionada pelo do tráfego de tratores na camada superficial de 0 – 20 cm tem um maior efeito na primeira passada e que nas demais o efeito torna-se reduzido. Além disso, esses autores observaram que nas camadas de 20 – 40cm, houve diferença significativa sobre a compactação, apenas na primeira passada do trator, e que nas camadas de 40 – 60 cm, não houve diferença relevante entre os números de passadas. Dessa forma, concluíram que os maiores danos e agravos referentes a compactação, ocorrem na camada superficial e na primeira passada.

Estudos recentes, realizado por Huang *et al.* (2022) demonstram que, apesar do efeito se reduzir nas demais passadas a constância de rodagem reforça os impactos da compactação, pois, como descrevem Shah *et al.* (2017), a pressão de contato com o solo causa a compactação na parte mais superficial do solo, ao mesmo tempo em que, a alta carga por eixo gera a compactação da subsuperfície agravando os efeitos desfavoráveis, em consequência do tamanho do maquinário e da carga por eixo, juntamente com certas características climáticas e propriedades do solo.

Corrêa da Silva (2014) e Spliethoff *et al.* (2020) explicam que a compactação altera a estrutura do solo, o volume e o arranjo dos poros afetando diretamente no comportamento hídrico no solo (na infiltração, na retenção e no movimento da água) devido a perda da conectividade dos

poros, sendo isso, atribuível à compressão vertical e cisalhamento lateral (LONGKAI *et al.*, 2021). Sendo assim, é caracterizada como uma das formas de degradação física do solo causando alterações em suas características e propriedades, como a redução da quantidade de poros (MOSCÔSO *et al.*, 2021), fertilidade do solo e o estoque de carbono orgânico (CAPELLO *et al.*, 2019).

Ao que concerne a porosidade do solo, a compactação do solo afeta principalmente os macroporos. Como já explicado, o espaço vazio do solo é constituído de macro e microporos, entretanto apenas os poros responsáveis pela aeração e infiltração de água sofrem com este impacto, influenciando as trocas gasosas, ciclagem de nutrientes, atividades microbianas e a redução do crescimento do sistema radicular, limitando o acesso a nutrientes e a água (PESSOA *et al.*, 2022; MOSCÔSO *et al.*, 2021; CAPELLO *et al.*, 2019).

No sistema radicular, os efeitos da compactação ocorrem com as alterações morfológicas e fisiológicas, afetando seu funcionamento, podendo citar como exemplo dessas modificações, a redução do tamanho e espessura da raiz, a redução da densidade de pêlos radiculares e a alteração celular. Com a destruição dos macroporos o movimento natural que seria percorrido pelas raízes no solo também sofrerá modificação, uma vez que, apesar do crescimento das raízes não se dá em uma única direção (SILVA; REINERT; REICHERT, 2000), em condições normais a direção preferencial é a vertical, o que não ocorre em solo compactado, onde observa-se crescimento tortuoso, se concentrando mais horizontalmente (SZATANIK-KLOC, 2018; ALVARENGA *et al.*, 1996).

Quanto ao desenvolvimento e crescimento das raízes das plantas, é importante compreender que algumas espécies são mais tolerantes à compactação do solo do que outras. Dessa forma, não se pode generalizar, atribuindo à compactação como única causa responsável por inibir o crescimento radicular, sendo necessário analisar também outros fatores como as características da cultura, às condições ambientais e a fase de desenvolvimento da cultura (BERGAMIN *et al.*, 2010; SPLIETHOFF *et al.*, 2020).

Alguns autores como Reinert *et al.* (2007) e Moscôso *et al.* (2021) propuseram algumas possíveis soluções para mitigação do problema como: a redução e/ou o controle do tráfego de caminhões, a redução da carga aplicada pelas máquinas e a rotação de cultura, já que a perda de matéria orgânica prejudica a qualidade estrutural e a estabilidade de agregados. Capello *et al.* (2019) sugerem a rotação de culturas com espécies que apresentam boa cobertura vegetal, visto

que, elas contribuem com a manutenção e melhoria da biodiversidade, da matéria orgânica e das propriedades do solo. Moscôso *et al.* (2021) complementam que é importante que as raízes sejam agressivas para romper as áreas compactadas, e que, concomitantemente, contribuem com nutrientes como nitrogênio e fósforo para o solo.

Longkai *et al.* (2021) esclarecem que, mesmo não havendo muitos estudos e relatos quanto a capacidade de penetração e desenvolvimento de raízes em solos, para diferentes culturas, é possível distinguir uma variação considerável tanto na capacidade de penetração, quanto no processo de alívio da compactação do solo entre as espécies.

### **3.4.1 Ensaio de compactação tipo Proctor Normal**

A necessidade de pesquisas para averiguações e compreensão mais assertiva de situações decorrentes da compactação estimulou o desenvolvimento de diversos métodos de estudos para simular em laboratório o comportamento e controle do solo, nas condições de campo. Um dos primeiros a existir e mais utilizado até a atualidade, é o ensaio Proctor Normal. Essa metodologia foi desenvolvida pelo engenheiro Ralph Proctor em 1933, sendo normatizada nos Estados Unidos pela *A.A.S.H.O - American Association of State Highway Officials* e no Brasil pela norma *ABNT NBR 7182/1986 - Ensaio de Compactação*.

Esse ensaio consiste em compactar uma amostra de solo em três camadas sucessivas, em um molde cilíndrico de dimensões especificadas, por intermédio de 25-26 golpes de um soquete com peso determinado caindo de uma altura prefixada (MURRIETA, 2018). Pode ser definido como Normal, Intermediário ou Modificado e pode ser realizado com ou sem reuso de material (KLEIN; MADALOSSO; BASEGGIO, 2013).

Ralph Proctor em 1933 estabeleceu por meio de observações em campo e laboratório que para a determinação da compactação os principais critérios é a quantidade de água no solo antes do processo e a energia que será empregada (MURRIETA, 2018), pois o processo da compactação se relaciona com a influência da água intersticial sobre as partículas de solo (KLEIN; MADALOSSO; BASEGGIO, 2013).

Segundo Klein, Madalosso e Baseggio (2013), no solo com baixa umidade, a água nos poros é retida pelas forças de absorção, pelo efeito de capilaridade e tensão da água, aderindo o solo por meio da coesão. Conforme o teor de umidade aumenta, as partículas de solo formam um

arranjo mais compacto, até o ponto em que a quantidade de água começa a absorver parte da energia empregada no processo reprimindo a compactação. Esse efeito explica a razão pela qual o ensaio é repetido para diferentes teores de umidade. Comumente, estabelece-se que deve haver pelo menos cinco pontos, de modo que dois estejam no ramo ascendente da curva (seco), um próximo à umidade ótima e outros dois no ramo descendente (úmido). Obtidos esses pontos, é possível determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo (CERQUEIRA; MATOS, 2019). A energia de compactação desse ensaio é de aproximadamente  $5,7 \text{ kg.cm/cm}^3$ , calculada pela expressão:

$$E = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V}$$

Em que:

*E = Energia específica de compactação, por unidade de volume;*

*P = Peso do soquete (kg);*

*h = Altura de queda do soquete (cm);*

*N = Número de golpes por camada;*

*n = Número de camadas;*

*V = Volume do solo compactado ( $\text{cm}^3$ ).*

### **3.4.2 Resistência do solo à penetração**

A compreensão das propriedades físicas do solo pode auxiliar na identificação de estratégias mais eficazes para o manejo sustentável, evidenciando assim a importância de analisar indicadores de qualidade do solo que estejam diretamente relacionados à produção da cultura (CORREIA, 2014). Dentre os principais indicadores para tal propósito, destaca-se a resistência do solo à penetração (RP), uma vez que, a partir dos valores obtidos, podem ser determinados limites críticos para cada cultura e indicar o melhor sistema de preparo do solo (FERNANDES *et al.*, 2020).

De acordo com Ferrari *et al.* (2018), a resistência do solo à penetração é um dos parâmetros mais aplicados para avaliar o grau de compactação que afeta o desempenho do solo. Também é eficiente na identificação das camadas compactadas ou adensadas, e da restrição mecânica ao crescimento radicular das plantas. Sua medição à campo é realizada por um penetrômetro, em razão da facilidade no uso, do baixo custo e da velocidade na obtenção de amostras (JOSÉ SILVA *et al.*, 2020).

A premissa desse instrumento tem como base a resistência do solo à penetração de uma haste, quando exercida uma força na parte superior desta por uma distância conhecida (CORREIA, 2014). Por ser um parâmetro prático que está associado a algumas propriedades do solo, seu uso pode ser realizado periodicamente para acompanhamento do estado de compactação do solo e avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo (CORTEZ *et al.*, 2019).

Conforme apontado por Souza *et al.*, (2021), a resistência do solo à penetração, depende tanto das características do solo quanto do sistema de manejo adotado, sendo assim, influenciada por determinadas propriedades do solo, como densidade do solo, textura, condição estrutural, cimentação, mineralogia, teor de matéria orgânica e de água presente no solo. Esses autores explicam que apesar da influência de algumas propriedades do solo, a densidade e o teor de água têm os maiores impactos de curto prazo na RP. Além disso, a relação da RP é diretamente proporcional com a densidade do solo e inversamente com o teor de água no solo (JOSÉ SILVA *et al.*, 2020).

Ademais, a resistência à penetração do solo é uma das principais propriedades físicas do solo diretamente relacionada com o crescimento das plantas e o desenvolvimento do seu sistema radicular (CORREIA, 2014), sendo responsável por regular a penetração de suas raízes e o alongamento delas pelo perfil do solo, além de sua acessibilidade à água (SOUZA *et al.*, 2021). Theodoro *et al.* (2018) explicam que quanto mais elevados os níveis de RP mais severa é a compactação. Souza *et al.* (2021) contribuíram com a discussão afirmando que o desenvolvimento do sistema radicular está correlacionado negativamente a RP, limitando a profundidade de exploração pelas raízes e restringindo a absorção de água e nutrientes.

Conforme os valores de RP vão aumentando, mais força e tensão mecânica devem ser aplicadas pelas raízes para penetrar o solo, resultando em maior esforço metabólico necessário para explorar o solo. Além disso, podem influenciar o fenótipo radicular das plantas, influenciado, por exemplo, no crescimento, ao apresentar sistema radicular mais raso, uma



redução do espessamento das raízes e na quantidade do número de raízes laterais e axiais, impedindo que um maior volume de solo seja explorado (COLOMBI *et al.*, 2018).

Conforme explicado por Benevenute *et al.* (2020), alguns casos em que ocorre redução na produtividade e no crescimento das culturas devido ao estresse hídrico, não acontece necessariamente pela baixa taxa de umidade do solo, mas sim pela RP que afeta a absorção de água pelas raízes.

De acordo com Cortez *et al.* (2019), os valores críticos de RP podem variar de 1,5 MPa a 4,0 MPa, sendo os valores próximos a 2 MPa já considerados como impeditivos ao crescimento radicular. Um valor de resistência à penetração superior a 2,5 MPa normalmente resulta em diferentes impactos no crescimento das plantas (FERNANDES *et al.*, 2020).

### **3.5 Erosão do solo**

A erosão é um processo natural de suma importância para a formação dos solos. Porém, segundo Reis (2017), as diversas atividades e ações antrópicas aceleram até cem vezes mais a velocidade dos processos erosivos, formando uma erosão excessiva que causa problemas locais e externos.

A pesquisa sobre a situação dos recursos globais do solo, publicada no relatório “*Situação dos recursos do solo do mundo*” (Status of the world’s soil resources), mostrou que mais de 30% dos solos do mundo estão degradados, em razão dos processos de compactação, erosão e das perdas de matéria orgânica e nutrientes. Além disso, foram estimadas perdas de 0,3% na produção agrícola causada pela erosão nas áreas cultivadas (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAO, 2015), sendo que essa situação ocorre em consequência das atividades cada vez mais intensas no solo.

Diante do cenário apresentado, a erosão tornou-se um dos mais preocupantes problemas ambientais da atualidade, uma vez que afeta tanto de forma direta quanto indireta a qualidade do meio das regiões que atinge. Constitui um processo gradativo de remoção das camadas superficiais de partículas de solo devido sua degradação, podendo decorrer tanto de forma natural quanto por ações antrópicas (REIS, 2017), principalmente em áreas de cultivo, devido ao uso constante do solo, e em alguns casos o uso de forma inadequada (MÜLLER, 2021).

É imprescindível a compreensão de que alguns solos têm mais propensão a sofrerem erosão que outros (CORRÊA DA SILVA, 2014), no entanto, a perda de solo também pode ser

influenciada pelo manejo incorreto ou agressivo, podendo acarretar ruptura na estrutura do solo, permitindo mais facilmente o carreamento dos sedimentos, causando a perda de solo, água, matéria orgânica, nutrientes, agroquímicos e contaminantes. Ademais, propicia a geração de custos adicionais (AVANZI *et al.*, 2013; SALOMÃO *et al.*, 2020).

Conforme Corrêa da Silva (2014), o manejo inadequado e o intenso tráfego de maquinários nas áreas agrícolas pode facilitar o início do processo erosivo, em consequência da compactação do solo e da propensão à formação de crostas. Como explicado pelos autores, essas complicações no solo auxiliam a ocorrência de erosão hídrica, visto que, ao reduzir a capacidade de infiltração de água no solo haverá um maior escoamento superficial.

Como explicado por Inácio Silva *et al.* (2019), o desenvolvimento da erosão hídrica começa no momento em que ocorre o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo causando a desagregação, e posteriormente o escoamento superficial transporta as partículas de solo soltas e as depositam em outros locais. Em virtude disso, a erosão hídrica é considerada a principal responsável pela perda substancial do solo (BRANNIGAN *et al.*, 2022), por apresentar alta capacidade de remoção e transporte de sedimentos (MORAIS; SALES, 2017).

As perdas de solos decorrentes da erosão hídrica, especialmente em áreas agrícolas, representam um grande prejuízo ambiental e econômico (MORAIS; SALES, 2017), por afetar a disponibilidade de solos férteis e a qualidade da água, permitindo a degradação das áreas cultivadas, implicando negativamente no desenvolvimento do sistema (PINTO *et al.*, 2020).

Além dos resultados negativos representarem uma ameaça à produtividade agrícola em algumas áreas, os danos nos locais externos também são preocupantes, como o assoreamento de corpos hídricos, o carreamento de poluentes, a poluição da água, a mudança geométrica do canal fluvial e os danos à infraestrutura causados por inundações lamacentas (REIS, 2017; PINTO *et al.*, 2020; BRANNIGAN *et al.*, 2022).

De acordo com Müller (2021), além da perda de água e solo, os efeitos negativos da erosão contribuem para a perda substancial dos nutrientes disponíveis no solo pela lixiviação, uma vez que, o processo de lixiviação dos nutrientes para as camadas mais profundas do solo pode ocorrer devido a fortes chuvas, que ao desagregar as partículas de solo removem também a matéria orgânica e minerais, inviabilizando a absorção dos nutrientes pelas plantas, além de promover a contaminação do lençol freático com produtos químicos advindos das plantações.

Em áreas agrícolas, por exemplo, ocorre a redução da camada produtiva do solo ocasionando o empobrecimento devido à perda de nutrientes. Outro efeito negativo que pode ocorrer no locais externos, é transporte dos nutrientes e produtos agrícolas utilizados na lavoura serem carregados para os cursos d'água próximos e/ou para águas subterrâneas causando poluição, eutrofização e sedimentação nestes locais, uma solução viável para mitigar o problema seria o planejamento prévio da produção correlacionado com práticas conservacionistas, como o revestimento do solo para promover a estabilidade do perfil do solo e estimular a fertilidade natural (NAPOLI *et al.*, 2016).

Um dos parâmetros que representa a suscetibilidade natural do solo à ação dos agentes erosivos é a erodibilidade (LIMA *et al.*, 2021), sendo um atributo intrínseco de cada solo (DUARTE *et al.*, 2020). Os principais fatores que afetam este parâmetro são as propriedades físico-químicas do solo correlacionadas à erosão do solo, como a capacidade de infiltração, o teor de matéria orgânica, a textura e estrutura do solo (CHEN *et al.*, 2022).

Alguns índices como a coesão do solo, a condutividade saturada, a resistência do solo à penetração, o diâmetro médio do peso dos agregados e o número médio de impacto da gota d'água também podem expressar a erodibilidade (WANG; ZHANG; WANG, 2022), pois refletem indiretamente este parâmetro por meio das propriedades físicas do solo, das propriedades hidráulicas e da capacidade de resistência à tensão de cisalhamento externa (CHEN *et al.*, 2022).

A desagregação do solo é afetada proporcionalmente à intensidade da precipitação, à velocidade e ao tamanho das gotas, uma vez que, o impacto das gotas provoca a ruptura das partículas superficiais do solo, e ao mesmo tempo propicia a compactação, reduzindo a capacidade de infiltração (REIS, 2017). Com isso, entende-se que a erodibilidade é a representação do efeito de todo esse processo, pois quanto menor a capacidade de infiltração, maior será a erodibilidade do solo (DUARTE *et al.*, 2020).

A erodibilidade expressa então a perda diferencial que os solos exibem quando os demais fatores que influenciam a erosão permanecem constantes, sendo influenciados sobretudo pelos processos e características que afetam a capacidade de infiltração e permeabilidade do solo e sua resistência à desagregação e ao transporte das partículas pelo fluxo superficial (DUARTE *et al.*, 2020; TEIXEIRA *et al.*, 2010).

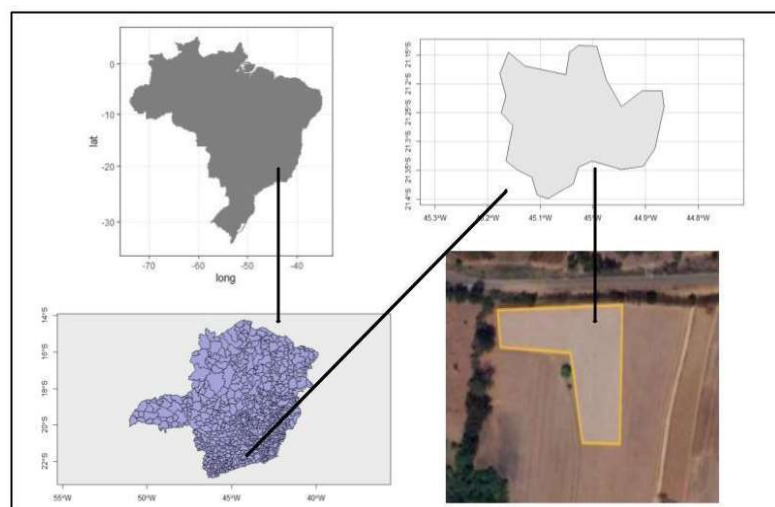
Compreende-se então que quanto maior a intensidade da chuva, a compactação do solo, a declividade da área ou o manejo maior será a erodibilidade do solo, assim como, quanto maior a capacidade de infiltração do solo e a proporção de cobertura vegetal na área menor será a erodibilidade naquele local (REIS, 2017).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área experimental

O estudo é uma pesquisa experimental quali-quantitativa, realizada na Fazenda experimental da Universidade Federal de Lavras (UFLA), localizada no município de Lavras - MG, a uma altitude de 910 m, com coordenadas geográficas 21°12'14'' S, 44°58'42'' W. O clima definido como Cwa de acordo com a classificação de Köppen (Kottek *et al.*, 2006), temperado chuvoso (mesotérmico) com inverno seco e verão chuvoso, subtropical, com inverno seco e temperatura do mês mais quente maior que 22 °C. O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico de textura argilosa de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SBCS, 2018). A média de distribuição de argila, silte e areia no perfil do solo da área experimental é de 530, 250 e 220 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

Figura 2 – Área em que o experimento está localizado.



Fonte: Do autor (2022).

## 4.2 Sistemas de manejo do solo

O delineamento experimental foi instalado em condições de sequeiro e irrigado, disposto em blocos, em esquema fatorial 3x2 (três níveis de compactação, 2 blocos), com duas repetições, totalizando 18 parcelas de mesma dimensão, em uma área de 5.400 m<sup>2</sup>, em que o fator de estudo foi a compactação. A diferença no nível inicial de compactação do solo foi obtida por meio do tráfego de trator, sendo estudado três níveis de compactação: sem compactação adicional (SCA); com 6 passadas de um trator (CA6); e com 12 passadas de um trator (CA12).

Figura 3 – Áreas de realização do experimento.



Legenda: área irrigada (A); área de sequeiro (B)

Fonte: Do autor (2022).

## 4.3 Avaliação das propriedades físicas do solo

O experimento foi instalado na safra de verão de 2021/2022 e as avaliações de resistência a penetração realizadas após a indução da compactação do solo, seguida com o ensaio de compactação tipo Proctor Normal para determinação da densidade máxima.

### 4.3.2 Ensaio normal de proctor

As amostras foram coletadas 30 de julho de 2022, nas profundidades de 0–10; 10–20; 20–30 cm, aproximadamente 5 kg de solo para cada profundidade, obtendo uma amostra composta, por faixa de compactação, com a mistura do solo coletado nos dois blocos. Obteve-se então 6 amostras de solo, três em condições de sequeiro e três do irrigado.

O ensaio de Proctor com reuso de material seguiu o padrão normalizado pela ABNT/NBR 7182, onde a curva de compactação foi obtida compactando-se o solo em três camadas com cinco/seis pontos de umidade. O reuso do material possibilitou que a cada fase de compactação e aumento da umidade o solo fosse destorroado para a repetição do procedimento.

Para a realização do ensaio utilizou-se um cilindro pequeno de 1000 cm<sup>3</sup> e 1998,5 g, um compactador de 2,5 kg com altura de queda de 30,5 cm, e cápsulas para determinação de umidade do solo. A compactação foi realizada com 26 golpes em cada camada, conforme NBR 7182.

A amostra de solo foi preparada em uma bandeja metálica, adicionando água e homogeneizando até que a umidade fosse uniformizada. Após a homogeneização iniciou-se o processo de compactação, após a compactação da terceira camada retirou-se o cilindro complementar (colarinho) e nivelou-se a superfície do material à altura do molde e, por fim, pesou-se o conjunto cilindro + solo úmido compactado.

Em seguida retirou-se a amostra do centro do molde com auxílio do extrator e pôs-se na estufa para determinação da umidade. Para repetição do procedimento todo o material foi destorroado, adicionado água e homogeneizando, de tal forma, que a umidade aumentasse uniformemente.

Os cálculos da densidade do solo e da umidade das amostras compactadas foram realizados por intermédio do software Excel. A planilha eletrônica disponibilizada em <http://www.upf.br/lafas> possibilitou a obtenção do teor de água do solo ótimo para compactação e da densidade do solo máxima, além da geração do gráfico referente a estes dados.

A determinação do teor de umidade ótima do solo para compactação e da densidade máxima do solo foi realizada de forma analítica por intermédio do Excel ajustando-se o polinômio ortogonal de 2º grau de dados não balanceados (densidade em razão da umidade ótima), utilizando modelos matemáticos descritos por Mischan e Pinho (1996) apud Klein, Madalosso e Baseggio (2013).

#### **4.3.3 Resistência à penetração**

Os locais para verificação da resistência à penetração na área com condições de sequeiro e irrigado, foram escolhidos conforme os estados de compactação (SCA, CA6, CA12). Em cada parcela selecionada foram realizadas 6 leituras de RP, medida em campo pelo índice de cone, até

0,60m de profundidade, com o penetrômetro dinâmico de impacto (modelo IAA/Planalsucar-Stolf), seguindo as recomendações descritas por Stolf et al. (1983). Os dados adquiridos por intermédio deste equipamento, são obtidos por esforço manual, já que, a ponta cônica e a haste do equipamento são inseridas no solo por meio da força do operador ao liberar o peso que provoca o impacto.

As leituras da penetração foram realizadas na própria haste, graduada em cm (STOLF et al., 1983) e anotada em planilhas específicas que foram levadas a campo, em 04/12/21 na área irrigada e em 04/03/2022 na área de sequeiro. Para o processamento dos dados obtidos em campo foi utilizado o programa computacional de dados em excel-vba, cujo a linguagem de programação é a Visual Basic Application (VBA) e a interface e o Excel, ambos da Microsoft (STOLF et al., 2014).

O programa excel-vba é constituído de 4 planilhas, sendo 3 operacionais e uma de ajuda. A planilha 1 funciona como a entrada dos dados obtidos em campo (nº de impactos e profundidade) tendo como saída a camada penetrada e é a resistência à penetração nas unidades: impactos/dm, kgf/cm<sup>2</sup> e MPa. Também são gerados automaticamente os gráficos correspondentes aos pontos analisados. A planilha 2 realiza a padronização dos intervalos de profundidade e a planilha 3 é uma planilha de entrada rápida, utilizada para facilitar pois permite a entrada dos dados em apenas duas colunas. (STOLF et al., 2014).

Conforme explicado por Stolf et al. (2014), os cálculos realizados pelo programa computacional para a resistência à penetração utilizam as seguintes equações:

- Equação 1:  $N$  (Impactos/dm) =  $10 \times n^\circ$  de impactos/penetração(cm)
- Equação 2:  $R$  (kgf/cm<sup>2</sup>) =  $5,6 + 6,89 \times N$  (impactos/dm)
- Equação 3:  $R$  (MPa) =  $0,56 + 0,689 \times N$  (impactos/dm).

Ou seja,  $R$  (MPa) =  $0,1 R$  (kgf/cm<sup>2</sup>).

Os dados coletados foram classificados conforme a Tabela 1, na qual são apresentadas as classes de resistência do solo à penetração (Soil Survey Staff, 1993, apud ARSHAD et al., 1996).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS DADOS

A partir do ensaio de compactação do solo realizado na energia normal de Proctor obteve-se a curva de compactação de cada solo e seus parâmetros de compactação (Apêndice 1), sendo

eles, a densidade máxima do solo ( $D_s$ ) e a umidade ótima de compactação ( $U_g$ ), descritos na tabela 1.

Tabela 1 – Valores de densidade máxima do solo ( $D_s$ ) e a umidade ótima de compactação ( $U_g$ ), sob diferentes profundidades, em área de sequeiro e irrigado.

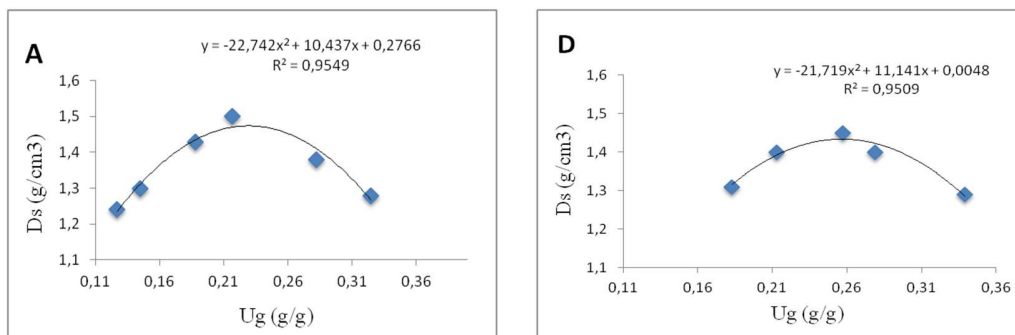
Amostras	Profundidade (cm)	Umidade Ótima de Compactação (g/g)	Densidade Máxima do Solo (g/cm <sup>3</sup> )
Sequeiro	0 - 10	0,229	1,475
	10 - 20	0,223	1,450
	20 - 30	0,219	1,499
Irrigado	0 - 10	0,256	1,435
	10 - 20	0,254	1,443
	20 - 30	0,252	1,438

Fonte: Do autor (2022)

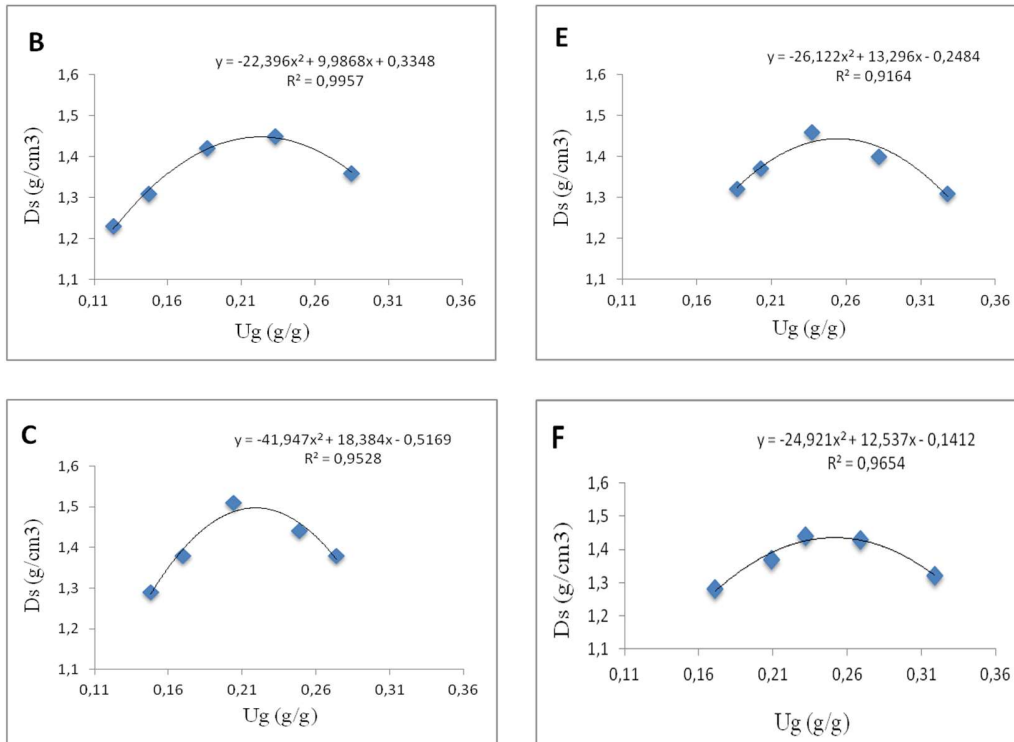
Analisando o comportamento da curva de compactação (Figura 4), o seu lado seco (esquerdo), revela que o aumento do teor de umidade do solo provoca o aumento da densidade do solo. À medida que a umidade aumenta, vai lubrificando as partículas de solo, facilitando a compactação, até chegar a um teor de umidade considerado ótimo à compactação, a partir da qual a densidade do solo começa a diminuir, pois a água em excesso, começa a dissipar a energia que está sendo aplicada para realizar a compactação.

As diferenças nos valores de densidade máxima entre as três profundidades analisadas, foram pequenas, em ambas as áreas. Na área de sequeiro essa diferença apresentou uma variação de aproximadamente 0,005 (g/cm<sup>3</sup>), enquanto na área irrigada foi de 0,002 (g/cm<sup>3</sup>).

Figura 4 – Densidade do solo ( $D_s$ ) em função da umidade gravimétrica ( $U$ ) obtida através do ensaio de normal Proctor para um Latossolo.







Legenda: A, B e C correspondem à área de sequeiro; D, E e F correspondem à área do irrigado, nas respectivas profundidades de 10, 20 e 30 cm.

Fonte: Do autor (2022).

Ao ser analisada uma área em relação a outra (Figura 4), foi identificado que a área de sequeiro apresentou maiores valores de densidade máxima do solo em comparação com a área irrigada nas três profundidades analisadas, influenciando em um maior nível de compactação nessas camadas, como comprovado nos dados de RP discutidos posteriormente. Já no irrigado, sua maior densidade foi identificada na camada de 10 – 20 cm, tendo maior propensão a sofrer compactação nessa camada.

No entanto foi possível identificar, por meio do ensaio de compactação, que apesar de haver diferença na densidade de ambas as áreas essa variação foi muito pequena, provavelmente essas áreas apresentam textura semelhantes e por esta razão as densidades mostraram valores próximos.

Os valores das medidas descritivas da resistência do solo à penetração nas diferentes profundidades de amostragem estão apresentados no apêndice 2, conforme seus níveis de compactação e áreas estudadas. Observou-se que a RP apresenta aumento das médias à medida que se aprofunda nas camadas de amostras, como será discutido adiante.

Na área irrigada identificou-se que onde não houve compactação (SCA) os valores médios de resistência à penetração foram inferiores a 1,5 MPa na profundidade mais superficial (0 – 10 cm) e nas camadas subjacentes houve um aumento na RP, porém permanecendo inferior ao valor de 2,5 MPa (Figura 5).

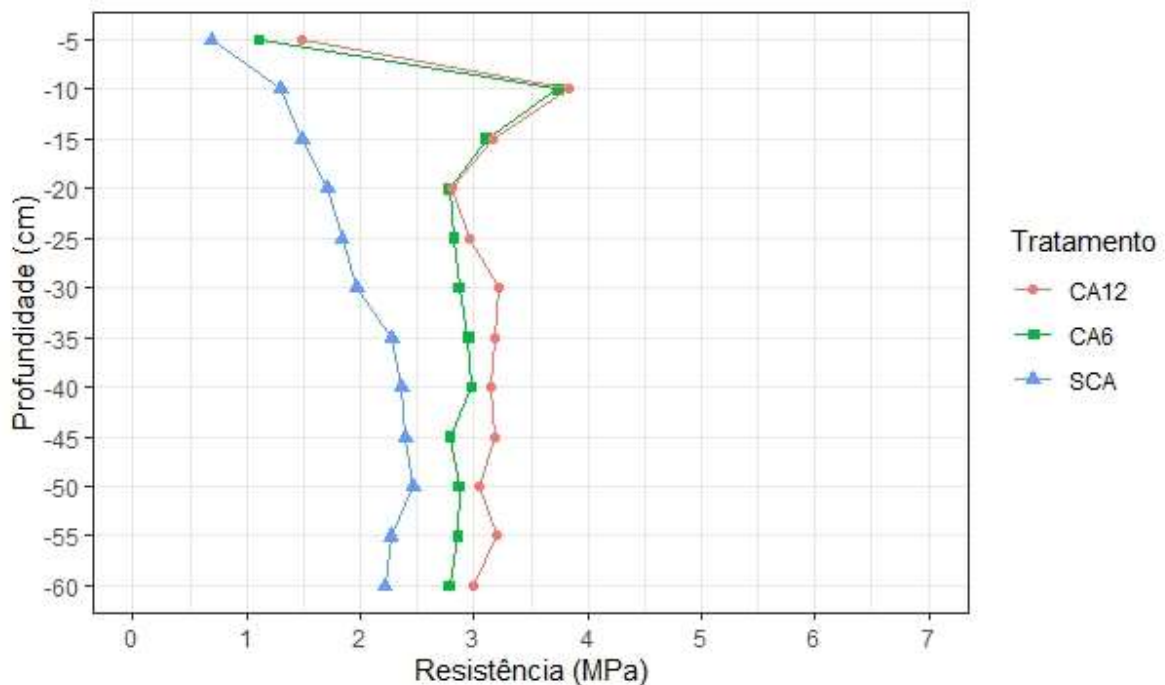
Ao analisar os dados da área que houve a compactação com 6 (CA6) e 12 passadas (CA12) verificou-se que houve um aumento significativo na camada superficial (0 – 10 cm) quando comparado ao SCA, apresentando valores de resistência à penetração superiores a 3,5 MPa considerados comumente como impeditivos para o crescimento e desenvolvimento radicular, seguida de uma redução na camada de 10 – 20 cm e mantendo quase que uma constância, apresentando pequenas variações na RP nas demais profundidades.

A redução na resistência do solo à penetração nas camadas mais profundas, pode estar relacionada ao aumento da umidade no perfil do solo por se tratar de uma área irrigada, uma vez que, a resistência do solo à penetração além de estar relacionada às características específicas do solo como estrutura e textura, também é dependente da umidade do solo (BEUTLER *et al.*, 2007; ASSIS *et al.*, 2009). Como a umidade é inversamente proporcional à força de coesão entre as partículas, o aumento no teor de água reduz a resistência do solo à penetração (ASSIS *et al.*, 2009).

Quanto a baixa variação da RP, Assis et al., (2009) explicaram que em solos cujas propriedades mecânicas dependem principalmente das forças de coesão, a RP permanece praticamente constante ao longo da profundidade. No entanto, mesmo com essa redução em maiores profundidades, constatou-se que houve um aumento gradativo de RP nas camadas subjacentes para ambos os tratamentos em relação ao SCA, pois as repetições de passagem de carga sobre o solo tornam maior o efeito da compactação, chegando a influenciar até as camadas mais profundas (REICHERT *et al.*, 2007).

Ao se comparar os níveis de compactação CA6 e CA12 entre si, verifica-se que o aumento da resistência do solo à penetração entre estes dois tratamentos é muito pequena, indicando então que as primeiras passadas influenciam mais na compactação do solo, em vista que, o efeito das passadas subsequentes foi menor (CUNHA, 2009).

Figura 5 – Resistência à penetração ao longo do perfil do solo área irrigada.



Fonte: Do autor (2022).

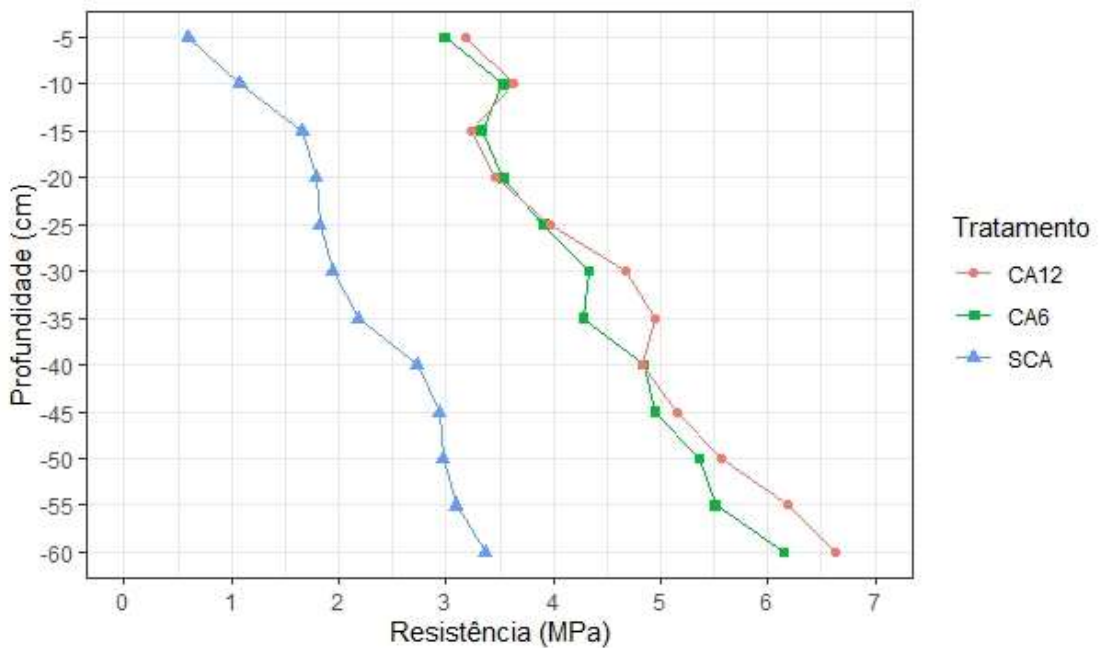
Na área de sequeiro verificou-se que nos três tratamentos houve um aumento gradativo da RP pelo perfil do solo (Figura 6). No tratamento SCA observou-se que na camada de 0 – 30 cm os valores de resistência à penetração do solo medido são todos inferiores a 2,0 MPa, enquanto a partir da camada de 30 cm até a camada mais profunda analisada (60 cm) os valores são superiores a este valor.

Na camada mais superficial, nos tratamentos de CA6 e CA12 a resistência à penetração observada é superior a 3,5 MPa, sendo esses valores considerados comumente como impeditivos para o crescimento e desenvolvimento radicular (SOUZA *et al.*, 2021). Os valores de RP na camada de 20 a 60 cm tanto no CA6 quanto no CA12 demonstram um aumento considerável em cada profundidade observada, sendo que na camada 50 – 60 cm estão os valores mais altos coletados, em que a RP > 6,0 MPa (Figura 6).

Com exceção da camada de 10 – 15 cm que apresentou uma pequena redução na RP para ambos os tratamentos, as demais profundidades demonstraram um aumento gradual da resistência do solo à penetração. Nunes (2016) e Shah *et al.*, (2017) explicam que em maior umidade, a coesão e a resistência do solo à penetração diminuem, no entanto, o comportamento da RP no

perfil do solo em profundidade não correspondeu com o esperado. Em razão disso, sugere-se que seja realizada uma análise detalhada do solo por meio de diagnósticos dos atributos (material orgânico e mineral, atividade da fração argila, saturação por base, mudança textural abrupta) e diagnósticos dos horizontes superficiais e subsuperficiais.

Figura 6 – Resistência à penetração ao longo do perfil do solo área de sequeiro.



Fonte: Do autor (2022).

A resistência do solo à penetração está diretamente associada à quantidade de passadas do trator e a área de coleta, assim, a resistência do solo à penetração apresentou interação entre os fatores, em todas as camadas avaliadas. Na área irrigada observou-se que à medida que a profundidade do solo aumentava, mesmo que os valores fossem crescentes não eram tão distantes no anterior coletado, conforme explicado por Cunha et al. (2009) e Espessato et al. (2017), que atestaram que o efeito do tráfego se concentra nas camadas mais superficiais do solo, entre 0 – 20 cm.

Há algumas divergências na literatura quanto ao valor de RP considerado impeditivo ao sistema radicular. Segundo Gonçalves et al. (2014) este valor é 2,5 MPa, enquanto Cavalieri et al. (2011) utilizaram 3,0 MPa, e Arshad et al. (1996) de 2,0 a 4,0 MPa. De maneira geral, considera-se de 2,0 a 2,5 MPa a faixa crítica de resistência do solo com redução importante no crescimento

e desenvolvimento radicular, sendo relevante salientar que cada solo apresenta uma densidade crítica que influencia na resistência do solo, além de que, o desenvolvimento do sistema radicular está relacionado com especificidades de cada espécie (REINERT, 2008).

Conforme identificado em ambas às áreas estudadas, os tratamentos CA6 e CA12 apresentaram na camada superficial e em todas as camadas subseqüente valores de RP superior a 2,0 MPa, indicando limitação ao crescimento radicular e à produtividade da maioria das culturas (CAROLINO DE SÁ *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2021), devido a impedância mecânica a menos que existam fissuras para as raízes explorarem (BENGOUGH *et al.*, 2011). Espessato *et al.*, (2017), descrevem que valores altos de resistência mecânica do solo até a profundidade de 0,20 m afetam o desenvolvimento e a produtividade das plantas.

## 6 CONCLUSÃO

Com o ensaio de compactação, foi possível identificar que, aparentemente, não há diferença expressiva de densidade máxima entre as áreas estudadas. Essa densidade, constitui um dos parâmetros a ser considerado no diagnóstico do estado de compactação do solo.

Na área irrigada, há um aumento nos valores de resistência a penetração na camada superficial que pode estar associado ao processo de compactação. Já na área de sequeiro, percebe-se que além do aumento na camada superficial, houve elevação em subsuperfície, abaixo de 30 cm de profundidade, o que pode estar associado a adensamento.

Análises complementares, como determinação de umidade, detalhamento da variação textural na camada de 0 – 60 cm, entre outras avaliações, são necessárias para o diagnóstico de compactação e afirmação do possível adensamento.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, Norma Brasileira – Solo: Ensaio de compactação NBR 7182:2016.
- ANDRADE, B. O., et al. Grassland Degradation and Restoration: A Conceptual Framework of Stages and Thresholds Illustrated by Southern Brazilian Grasslands. **Natureza e Conservação**, v. 13, n. 2, 2015, p. 95-104. SCOPUS. DOI: 10.1016/j.ncon.2015.08.002.
- ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 319-326, 1996.
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W. & JONES, A. J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America. 1996. p. 123-141 (SSSA Special publication 49).
- ASSIS, R. L. de et al. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola [online]**, v. 29, n. 4, pp. 558-568. 2009
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7182**: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro: 2016. 13p.
- AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; NORTON, L. D.; BESKOW, S.; MARTINS, S. G. Spatial distribution of water erosion risk in a watershed with eucalyptus and Atlantic Forest. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 5, p. 427-434, 2013.
- BARNES, G. **Mecânica dos Solos: Princípios e Práticas**. São Paulo: LTC, 2016. 576 p.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Sistemas de manejo do solo e seus efeitos sobre o rendimento do milho. **Ciência Rural [online]**. 1998, v. 28, n. 1, p. 23-28.
- BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Alongamento da raiz, estresse hídrico e impedância mecânica: Uma revisão das tensões limitantes e características benéficas da ponta da raiz. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.
- BENEVENUTE, P. A. N.; MORAIS, E. G.; SOUZA, A. A.; VASQUES, I. C. F.; CARDOSO, D. P.; SALES, F. R.; SEVERIANO, E. C.; HOMEM, B. G. C.; CASAGRANDE, D. R.; BRUNO M. S. Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures, **Ecological Indicators**, v. 117, 106647, ISSN 1470-160X. 2020.
- BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A. DE.; SOUZA, F. R. de. Compactação em um latossolo vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo [online]**. 2010, v. 34, n. 3, p. 681-691, 2010.

- BERTOLLO, M; LÖBLER, C. A.; DANTAS, J. S. **Geomorfologia**. Porto Alegre: SAGAH, 2019. 235 p.
- BERTOLLO, M. *et al.* **Pedologia**. Porto Alegre: SAGAH, 2021. p. 286.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Engenharia Agrícola [online]**, v. 27, n. 1 pp. 146-151. 2007.
- BRANNIGAN, N.; MULLAN, D.; VANDAELE, K.; GRAHAM, C.; MCKINLEY, J.; MENEELY, J. Modelling soil erosion by water under future climate change: Addressing methodological gaps, **CATENA**, v. 216, Part B, p. 106403, 2022.
- CAPELLO, G.; BIDDOCU, M.; FERRARIS, S.; CAVALLO, E. Effects of Tractor Passes on Hydrological and Soil Erosion Processes in Tilled and Grassed Vineyards. **Water**, v. 11, 25 p. 2019.
- CAPUTO, H. P. *et al.* **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos**. 7. ed. São Paulo: LTC, 272 p. v. 1, 2015.
- CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A. de; SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L.; TORMENA, A.C. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1541-1550, 2011.
- CERQUEIRA, J. DE O. F.; MATOS, I. B. **Estudo de compactação para confecção de amostras de solo com plantio de capim vetiver**. [S. l.: s. n.] XVIII SEPA - Seminário estudantil de produção acadêmica, UNIFACS. 2019.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade do solo. Disponível em:< <https://cetesb.sp.gov.br/solo/propriedades>>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- CHEN, S.; ZHANG, G.; ZHU, P.; WANG, C.; WAN, Y. Impact of slope position on soil erodibility indicators in rolling hill regions of northeast China, **CATENA**, v. 217, p. 106475, 2022.
- COLOMBI, T.; TORRES, L.C.; WALTER, A.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle, **Science of The Total Environment**, v. 626, p. 1026-1035, 2018.
- CORREIA, F. R. Avaliação do estado de compactação do solo em área de agricultura e de floresta de eucalipto. p 29. Monografia (Bacharel em Engenharia Florestal) da Universidade de Brasília, Brasília, 2014.



CORTEZ, J. W.; MORENO, C. T. M.; FARINHA, L. S.; ARCOVERDE, S. N. S.; VALENTE, I. Q. M. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um sistema de semeadura direta. **Científica**, Jaboticabal, v. 47, n. 2, p. 175-182, 2019.

CUNHA, J. P. A. R. DA; CASCAO, V. N.; REIS, E. F. DOS. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 371-375, jun. 2009.

CORRÊA DA SILVA, R. **Mecanização e manejo do solo**. São Paulo: Editora Saraiva, 2014. 120 p.

DONG, L.; LI, J.; ZHANG, Y.; BING, M.; LIU, Y.; WU, J.; HAI, X.; LI, A.; WANG, K.; WU, P.; SHANGGUAN, Z.; DENG, L. Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau, **Journal of Environmental Management**, v. 302, part A, p. 113985, 2022.

DUARTE, M. L.; SILVA FILHO, E. P. da; BRITO, W. B. M.; SILVA, T. A. da. Determinação da erodibilidade do solo por meio de dois métodos indiretos em uma bacia hidrográfica na região sul do estado do Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 21, n. 2, 2020.

EMBRAPA. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2. ed. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. p. 34; (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Territorial, ISSN 1806-3322; 35).

ESPESSATO, R. R.; LEITE, F.; GUERREIRO, J. C.; QUIQUI, E. M. D.; AZEVEDO, A. P. DE.; ALEIXO, E. V. Soybean development as a function of traffic of tractor with radial tires. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online]. 2017, v. 21, n. 10, p. 726-730.

FAGUNDES, M. O.; REIS, D. A.; PORTELLA, R. B.; PERINA, F. J.; BOGIANI, J. C.. Qualidade de um latossolo sob plantio convencional e sistema plantio direto no cerrado baiano, **Brasil. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 3, p. 281-297, 2019.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DO SISTEMA PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP. Sistema de Plantio Direto no Brasil. Disponível em: <<https://febrapdp.org.br/historico>>. Acesso em 14 jul. 2022.

FERNANDES, M. M. H.; COELHO, A. P.; SILVA, M. F.; BERTONHA, R. S.; QUEIROZ, R. F.; FURLANI, C. E. A.; FERNANDES, C. Estimation of soil penetration resistance with standardized moisture using modeling by artificial neural networks, **CATENA**, v. 189, 104505, 2020.

FERRARI, J. M. S.; GABRIEL, C. P. C.; SILVA, T. B. G.; MOTA, F. D.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; TANAKA, E. M. Analysis of the spatial variability of resistance to soil penetration at

- different depths. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, São Paulo, Brazil, v. 12, n. 2, p. 164–175, 2018.
- FINKLER, R. *et al.* **Ciências do solo e fertilidade**. Porto Alegre: SAGAH, 2018. 240 p.
- GABRIEL FILHO, A. *et al.* Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural** [online], v. 30, n. 6, p. 953-957, 2000.
- GALDOS, M. V.; PIRES, L. F.; COOPER, H. V.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography, **Geoderma**, v. 337, 2019, p. 1126-1135.
- GONÇALVES, W. G.; SEVERIANO, E. da C.; SILVA, F. G.; COSTA, K. A. de P.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. da S.; MELO, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado Latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p. 432-443, 2014.
- H. WICKHAM. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016.
- HUANG, X.; HORN, R.; REN, T. Soil structure effects on deformation, pore water pressure, and consequences for air permeability during compaction and subsequent shearing, **Geoderma**, v. 406, 2022.
- INÁCIO SILVA, J. R.; SOUZA, E. S. DE.; SOUZA, R.; SANTOS, E. S. DOS.; ANTONINO, A. C. D. Efeito de diferentes usos do solo na erosão hídrica em região semiárida. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 272-283, 2019.
- JARDIM, A. M. da R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. do N.; SILVA, M. J. da; MORAIS, J. E. F. de; SILVA, T. G. F. da. Estimativas de perda de solo por erosão hídrica para o município de Serra Talhada, PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 186–193, 2017.
- JOSÉ SILVA, G.; MAIA, J. C. DE S.; ESPINOSA, M. M.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; BIANCHINI, A.; VALADÃO, F. C. de A. Resistência à penetração em solo sob pastagem degradada. **Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v. 29, n. 2, p. 256-273, 2020.
- JÚNNYOR, W. S. G.; MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DISERENS, E.; SEVERIANO, E. C.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M.; Conservation systems change soil resistance to compaction caused by mechanised harvesting. **Industrial Crops and Products**, v. 177, 2022, pp. 114532.
- KLEIN, V. A.; MADALOSSO, T.; BASEGGIO, M. Ensaio de Proctor normal – análise metodológica e planilha para cálculo da densidade do solo máxima e teor de água ótimo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 12, n. 2, p. 199-203, 2013.

- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. Mapa-múndi da classificação climática de Köppen-Geiger atualizado Meteorol. Z., v.15, n.3, 2006, p. 259-263.
- LILLY, A.; BAGGALEY, N. J.; LOADES, K. W., MCKENZIE, B. M.; TROLDBORG, M. Soil erosion and compaction in Scottish soils: adapting to a changing climate. **ClimateXChange**, 2018.
- LIMA, C. G. DA R.; BACANI, V. M.; MONTANARI, R.; VICK, E. P.; FERREIRA, C. C.; SILVA, E. R. S. Metodologias indiretas de mensuração da erodibilidade do solo e caracterização da variabilidade espacial. **Mercator**, Fortaleza, v. 20, 2021.
- LONGKAI Y.; YI W.; LI W.; SHUIHONG Y.; CONG C.; LIDONG R.; BIN Z.; Impacts of soil compaction and historical soybean variety growth on soil macropore structure. **Soil and Tillage Research**, v. 214, 2021, pp. 105166.
- MALTA, A. O. de; PEREIRA, W. E.; TORRES, M. N. N.; MALTA, A. O. de; SILVA, E. S. da; SILVA, S. I. A. da. Atributos físicos e químicos do solo cultivado com gravioleira, sob adubação orgânica e mineral. **PesquisAgro**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 11-23, 2019.
- MENDES et al., 2007. Circular Técnica: Adensamento e compactação de solos irrigáveis da zona semi-árida do Nordeste brasileiro. **EMBRAPA**, Recife, n. 38, p. 1-8, dez. 2007. Disponível em:<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/856136/1/circular tecnica38adensamento.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2022.
- MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. **Propriedades físicas do solo sob diferentes níveis de compactação em um latossolo vermelho distroférico**. Unidade: Embrapa Soja, Londrina, 2011. p. 51-55. Disponível em:<<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/909344/1/propriedades.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural** [online], v. 36, n. 6, p. 1765-1772, 2006.
- MACHADO, P. L. O. de A. Compactação do solo e crescimento de plantas: como identificar, evitar e remediar. **Embrapa Solos**, Rio de Janeiro, p. 18, 2003.
- MORAES, C. S. Práticas conservacionistas. In: MÜLLER, F. C. *et al.* **Uso, manejo e conservação do solo**. Porto Alegre: SAGAH, 2021. cap. 5, p. 79-95.
- MORAIS, R. C. DE.; SALES, M.C.L. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. **Caderno de Geografia**, 27(1), 2017.

- MOSCÔSO, J. S. C. Compactação do solo. *In: MÜLLER, F. C. et al. Uso, manejo e conservação do solo.* Porto Alegre: SAGAH, 2021. cap. 4, p. 45-58.
- MÜLLER, F. C. Erosão do solo. *In: MÜLLER, F. C. et al. Uso, manejo e conservação do solo.* Porto Alegre: SAGAH, 2021. cap. 2, p. 29-36.
- MÜLLER, F. C. Sistemas de preparo e manejo do solo. *In: MÜLLER, F. C. et al. Uso, manejo e conservação do solo.* Porto Alegre: SAGAH, 2021. cap. 3, p. 45-58.
- MURRIETA, P. **Mecânica dos Solos.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 367.
- NAPOLI, M.; CECCHI, S.; ORLANDINI, S.; MUGNAI, G.; ZANCHI, C. A. Simulation of field-measured soil loss in Mediterranean hilly areas (Chianti, Italy) with RUSLE. **Catena**, v. 145, p. 246-256, 2016.
- NUNES, J. N. V. Avaliação da qualidade física de solos irrigados do rio grande do sul e de funções de pedotransferência para a estimativa da retenção de água. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2016.
- OLIVEIRA, R. de J. Cultivo de gladiolo em sistema de plantio direto orgânico. 36 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Agronomia) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Laranjeiras do sul, 2022.
- OLIVEIRA, M. P.; ROQUE, C. G.; BORGES, M. C. R. Z.; OLIVEIRA, R. P.; NOGUEIRA, K. B. Efeito residual da gessagem e calagem na resistência à penetração obtida com dois penetrômetros em diferentes sistemas de manejo. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia - MS, v. 4, n. 1, p. 58 - 64, jan./mar. 2017.
- ORGANIZAÇÃO DE ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA DAS NAÇÕES UNIDAS - FAO e INTERGOVERNAMENTAL PAINEL TÉCNICO SOBRE SOLOS - ITPS. **Status of the World's Soil Resources (SWSR)** – Main Report. Roma: FAO e ITPS, 2015. p. 650.
- PACHECO, B. R. O.; LIMA, C. S. M.; MAKOSKI, J. R.; ROSA, G. G. Classificação comercial e caracterização físico-química de beterrabas oriundas de sistema de plantio direto de hortaliças sob diferentes densidades de palhada de milho. **Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha**, v. 22, n. 2, 2021. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81369610008>>. Acesso em: 5 jul. 2022.
- PANAGOS, P.; STANDARDI, G.; BORRELLI, P.; LUGATO, E.; MONTANARELLA, L.; BOSELLO, F. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. **Land Degrad Dev.** 2018.
- PELINSON, N. S. *et al.* **Morfologia e Gênese do Solo.** Porto Alegre: SAGAH, 2021. p. 407.

PESSOA, T. N.; COOPER, M.; NUNES, M. R.; UTEAU, DANIEL.; PETH, S.; VAZ, C. M. P.; LIBARDI, P. L. 2D and 3D techniques to assess the structure and porosity of Oxisols and their correlations with other soil properties, *CATENA*, v. 210, 2022, 105899.

PETREIRE, V. G.; CUNHA, T. J. F. Manejo e conservação do solo. Sistemas de Produção. 2. ed. Embrapa Semiárido, 2010. [Versão Eletrônica]. Disponível em: <[http://www.cpatsa.embrapa.br:8080/sistema\\_producao/spuva/manejo.html](http://www.cpatsa.embrapa.br:8080/sistema_producao/spuva/manejo.html)>. Acesso em: 27 JUN 2022.

PICCIN, M.; AMADO, T. J. C.; FIORIN, J. E. Estratégias de manejo para melhoria da camada de enraizamento profunda de um Latossolo. *Rev. de Ciências Agrárias*, Lisboa, v. 43, n. 2, jun. 2020.

PINHEIRO, L. da S.; SILVA, R. C.; VIEIRA, R. da C.; AGUIAR, R. O.; NASCIMENTO, M. R. do; VIEIRA, M. M.; SOUSA, R. F.; OLIVEIRA, J. T. de.; SILVA, J. N. da.; SILVA, V. F. A.; SILVA, P. A. Path analysis of physical attributes in maize (*Zea mays* L.) under conventional cultivation system. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 10, n. 1. 2021.

PINHO, S. Z. de; MISCHAN, M. M. Análise de regressão em experimentos em parcelas subdivididas com dados não-balanceados: uma solução na linguagem glim. *Scientia Agricola* [online], v. 53, n. 1, p. 131-137. 1996.

PINTO, G. S.; SERVIDONI, L. E.; LENSE, G. H. E.; MOREIRA, R. S.; MINCATO, R. L. Estimativa das perdas de solo por erosão hídrica utilizando o Método de Erosão Potencial. *Revista do Departamento de Geografia*, [S. l.], v. 39, p. 62-71, 2020.

R CORE TEAM R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021 URL <https://www.R-project.org/>.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 5, p. 49-134, 2007.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C. & ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileiro de Ciência do Solo*, 2008.

REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. de. Relative compaction, physical properties and crop yield in Oxisol and Alfisol. *Pesq. agropec. bras*, v. 42, 1159–1167. 2007.

REIS, A. C. **Manejo de Solo e Plantas**. Porto Alegre: SAGAH, 2017. 146 p.

RIBEIRO, T. de S. Variabilidade espacial da compactação superficial e subsuperficial de uma topossequência sob pastagem. p. 36. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2012.

- ROMERO, E. M.; SOUZA, C. M. de; OLIVEIRA, A. M. S.; FERNANDES, R. B. A. Incorporação de biomassa de braquiária em um latossolo vermelho amarelo e sua relação com a densidade máxima obtida no ensaio proctor normal. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, [S. l.], v. 16, n. 3, 2008.
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2. ed. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. p. 34; (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Territorial, ISSN 1806-3322; 35).
- RUBIRA, F. G. et al. Pedogeomorphological systems in the interpretation of the evolution of quaternary landscapes in humid tropical climates. **Mercator**, Fortaleza, v. 18. 2019.
- SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 47, n. 3, p. 429-438, jul-set, 2016.
- SALOMÃO, P. E. A.; KRIEBEL, W.; SANTOS, A. A. dos; MARTINS, A. C. E. The Importance of Straw No-Tillage System for Soil Restructuring and Organic Matter Restoration. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e154911870, 2020.
- SHAH, A.N., TANVEER, M., SHAHZAD, B. *et al.* Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. **Environ Sci Pollut Res**. v. 24, 10056–10067, 2017.
- SILVA, G. J.; DE S. MAIA, J. C.; ESPINOSA, M. M.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; BIANCHINI, A.; VALADÃO, F. C. de A. Resistência à penetração em solo sob pastagem degradada, **Revista Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v. 29, n. 2, p. 256-273, 2020.
- SILVA, F. J.; OLIVEIRA, C. A. A.; ALMEIDA, L. S.; LIMA, L. P.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e produtividade do milho. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia - MS, v. 4, n. 3, p. 77-84, jul./set. 2017.
- SILVA, V. R. DA.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural** [online], v. 30, n. 5, p. 795-801. 2000.
- SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS - SBCS. **Técnico da Embrapa Solos-Livro (INFOTECA-E)**. 2018.
- SOUZA, R.; HARTZELL, S.; FERRAZ, A. P. F.; ALMEIDA, A. Q.; LIMA, J. R. DE S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments, **Soil and Tillage Research**, v. 205, 104768, ISSN 0167-1987, 2021.
- SPLIETHOFF, J.; POTT, C. A.; RAMPIM, L.; WATZLAWICK, L. F.; JADOSKI, S. O. Soil compaction limits for *Ilex paraguariensis*. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 5, 2020.

STAMFORD, Newton *et al.* Microbiota dos Solos Tropicais. *In: MICHEREFF, Sami et al.* Ecologia e manejo de patógenos radiculares em solos tropicais. Recife: UFRPE, Imprensa Universitária, 2005. cap. 4, p. 61-92.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. **Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1983. 9p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n. 1)

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; GABRIEL SILVA, L. Penetrômetro de impacto stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 774-782, jun. 2014.

SUGUIO, K. Geologia Sedimentar. 1. ed. São Paulo: Blücher, 2003. p. 383.

SZATANIK-KLOC, A.; HORN, R.; LIPIEC, J.; SICZEK, A.; SZEREMENT, J. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots, **Soil and Tillage Research**, v. 175, 2018, p. 226-233.

TESTONI, S. A. Introdução ao uso, manejo e conservação do solo. *In: MÜLLER, F. C. et al.* **Uso, manejo e conservação do solo**. Porto Alegre: SAGAH, 2021. cap. 1, p. 11-28.

THEODORO, G. de F.; GOLIN, H. de O.; DA SILVA, M. S.; REZENDE, R. P.; ABREU, V. L. S. de. Influência de sistemas de preparo na manutenção da palhada e resistência do solo à penetração. **Revista de agricultura neotropical**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 25–30, 2018.

WANG, H.; ZHANG, G.; WANG, J. Plant community near-surface characteristics as drivers of soil erodibility variation along a slope gradient in a typical semiarid region of China, **CATENA**, v. 212, 106108, ISSN 0341-8162. 2022.

XINJUN, H.; RAINER H.; TUSHENG R. Soil structure effects on deformation, pore water pressure, and consequences for air permeability during compaction and subsequent shearing. **Geoderma**, v. 406, 2022, pp.115452.

**APÊNDICE 1**

Valores de Densidade do solo (Ds) e umidade gravimétrica (Ug) obtida através do ensaio normal de Proctor referente à área de sequeiro.

<b>Amostra</b>	<b>Ds (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ug (g/g)</b>
Camada superficial (0 – 10 cm)		
1	1,24	0,127
2	1,30	0,145
3	1,43	0,188
4	1,50	0,217
5	1,38	0,282
6	1,28	0,325
Camada intermediária (10 – 20 cm)		
1	1,23	0,123
2	1,31	0,147
3	1,42	0,187
4	1,45	0,233
5	1,36	0,285
Camada inferior (20 – 30 cm)		
1	1,29	0,148
2	1,38	0,170
3	1,51	0,204
4	1,44	0,249
5	1,38	0,247

Valores de Densidade do solo (Ds) e umidade gravimétrica (Ug) obtida através do ensaio normal de Proctor referente à área irrigada.

<b>Amostra</b>	<b>Ds (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ug (g/g)</b>
Camada superficial (0 – 10 cm)		
1	1,31	0,183
2	1,40	0,213
3	1,45	0,257
4	1,40	0,279
5	1,29	0,339
Camada superficial (0 – 10 cm)		
1	1,32	0,187
2	1,37	0,203
3	1,46	0,237
4	1,40	0,282
5	1,31	0,328
Camada inferior (20 – 30 cm)		
1	1,28	0,171
2	1,37	0,209
3	1,44	0,232
4	1,43	0,269
5	1,32	0,319



## APÊNDICE 2

Valores médios de RP para diferentes níveis de compactação na área de sequeiro.

Profundidade (cm)	Tratamento		
	SCA	CA6	CA12
0 – 5	0,60	2,99	3,19
5 – 10	1,08	3,53	3,63
10 – 15	1,66	3,33	3,23
15 – 20	1,79	3,53	3,45
20 – 25	1,82	3,91	3,98
25 – 30	1,94	4,33	4,67
30 – 35	2,18	4,28	4,95
35 – 40	2,73	4,84	4,83
40 – 45	2,94	4,95	5,16
45 – 50	2,97	5,36	5,57
50 – 55	3,09	5,51	6,18
55 – 60	3,37	6,15	6,63

Valores médios de RP para diferentes níveis de compactação na área irrigada.

Profundidade (cm)	Tratamento		
	SCA	CA6	CA12
0 – 5	0,69	1,11	1,49
5 – 10	1,30	3,74	3,83
10 – 15	1,49	3,11	3,16
15 – 20	1,71	2,78	2,80
20 – 25	1,84	2,82	2,96
25 – 30	1,97	2,87	3,22
30 – 35	2,28	2,95	3,19
35 – 40	2,36	2,98	3,14
40 – 45	2,40	2,79	3,19
45 – 50	2,47	2,87	3,05
50 – 55	2,27	2,86	3,20
55 – 60	2,22	2,78	2,99

Legenda: Os níveis de compactação foram SCA - sem compactação adicional, CA6 - compactação com 6 passadas do trator, CA12 - compactação com 12 passadas do trator.