

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ELCIO DOS SANTOS BACKES

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE
CULTURAS EM ÁREAS COM E SEM TERRAÇO**

DOIS VIZINHOS

2023

ELCIO DOS SANTOS BACKES

**PROPRIEDADES FÍSICO-HIDRICAS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE
CULTURAS EM ÁREAS COM E SEM TERRAÇO**

Trabalho de conclusão de curso de Dissertação apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-graduação em Agroecossistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Laercio Ricardo Sartor
Coorientador: Prof. Dr. André Pellegrini

DOIS VIZINHOS

2023



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Dois Vizinhos**



ELCIO DOS SANTOS BACKES

PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE CULTURAS EM ÁREAS COM E SEM TERRAÇO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências Agrárias da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Agroecossistemas.

Data de aprovação: 22 de Junho de 2023

Dr. Laercio Ricardo Sartor, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Graziela Moraes De Cesare Barbosa, Doutorado - Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná

Dra. Miriam Fernanda Rodrigues, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Utfpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 22/06/2023.

Dedico este trabalho à minha família por todo apoio ao longo destes anos, e para todas as pessoas que fizeram parte deste processo.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte desta importante fase de minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Laercio Ricardo Sartor pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória. Ao meu coorientador, Prof. Dr. André Pellegrini por ceder a área experimental e o material de laboratório necessário para desenvolvimento deste projeto.

Ao Grupo de Pesquisa em Ciência do solo, UTFPR campus Dois Vizinhos por todo suporte.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus de Dois Vizinhos, aos docentes do Programa de Pós- Graduação em Agroecossistemas pela oportunidade e ensinamentos, aos discentes, pela amizade e suporte e à Seção Técnica de Pós-Graduação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer este desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Os sonhos são como uma bússola, indicando os caminhos que seguiremos e as metas que queremos alcançar. São eles que nos impulsionam, nos fortalecem e nos permitem crescer.
(Augusto Cury)

RESUMO

A erosão pode gerar perdas de solos agricultáveis e assoreamento de cursos d'água e reservatórios e, por isso, entender as suas causas ajuda na tomada de decisão sobre ações para mitigar a ocorrência da erosão e na adoção de medidas para a conservação dos ambientes. Por isso a adoção de sistemas conservacionistas, que mantenham o solo protegido, é essencial, uma vez que visam melhorar a qualidade física, química e biológica do solo e controlar os agentes dos processos erosivos. Um exemplo é o uso de terraceamento, que visa minimizar o processo erosivo e é feito por meio da construção de terraços, que se for em nível visa segmentar o volume escoado nas encostas das lavouras e aumentar a infiltração da água das chuvas. Assim, o presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento físico-hídrico do solo em área com terraços e em área onde os terraços foram retirados, e mensurar o reflexo disso na produtividade das culturas da soja e milho na região Sudoeste do Paraná. Foram delimitadas duas áreas de 1,92 ha denominadas megaparcelsas com e sem terraços, avaliando a produção de soja (safra 2019/20 e 2020/21) e milho safrinha (2021). Para a caracterização físico-hídrica dos solos foram analisadas a condutividade hidráulica, a porosidade total, a micro e a macroporosidade, a densidade do solo e de partículas, a distribuição granulométrica, a resistência do solo à penetração, a umidade volumétrica, a estabilidade dos agregados, e a produtividade das culturas. Além disso, o monitoramento pluviométrico foi realizado. O solo foi caracterizado como muito argiloso e, por isso, teve densidade de partícula alta, característico de um solo rico em óxidos de ferro. Também foi detectada alta porosidade total, com valores de macroporosidade não limitantes à aeração e predomínio de microporos que levam ao aumentando a umidade volumétrica e densidade do solo abaixo do limite crítico para solos muito argilosos. A condutividade hidráulica do solo saturado e o diâmetro médio ponderado foram maiores na camada superficial do solo devido à presença de macroporos. A produtividade da soja na safra 2019/20 não diferiu entre as áreas com e sem terraços. Em 2020/21, a área com terraços teve maior produtividade. Em relação ao milho safrinha, não foi observada diferença significativa. Como os terraços da área avaliada foram retirados recentemente, ainda não é possível observar influência dessa prática nas propriedades físico-hídricas do solo e seu efeito sobre a produtividade das culturas, sendo necessária a continuidade do estudo.

Palavras-chave: soja; milho; erosão; terraceamento; plantio direto.

ABSTRACT

Erosion can lead to loss of arable land and silting up of watercourses and reservoirs and, therefore, understanding its causes helps in decision-making on actions to mitigate the occurrence of erosion and in the adoption of measures for the conservation of environments. That is why the adoption of conservationist systems, which keep the soil protected, is essential, since they aim to improve the physical, chemical and biological quality of the soil and control the agents of erosion processes. An example is the use of terracing, which aims to minimize the erosive process and is done by building terraces, which, if level, aims to segment the volume drained on the slopes of the crops and increase the infiltration of rainwater. Thus, the present work aimed to study the physical-hydric behavior of the soil in an area with terraces and in an area where the terraces were removed, and to measure the reflection of this in the productivity of soybean and corn crops in the Southwest region of Paraná. Two areas of 1.92 ha called megaplots with and without terraces were delimited, evaluating the production of soybean (2019/20 and 2020/21 harvests) and off-season corn (2021). For the physical-hydric characterization of the soils, hydraulic conductivity, total porosity, micro and macroporosity, soil and particle density, granulometric distribution, soil resistance to penetration, volumetric humidity, stability of soils were analyzed. aggregates, and crop productivity. In addition, rainfall monitoring was carried out. The soil was characterized as very clayey and, therefore, had a high particle density, characteristic of a soil rich in iron oxides. High total porosity was also detected, with macroporosity values not limiting aeration and a predominance of micropores that lead to an increase in volumetric moisture and soil density below the critical limit for very clayey soils. The hydraulic conductivity of the saturated soil and the weighted average diameter were higher in the surface layer of the soil due to the presence of macropores. Soybean productivity in the 2019/20 season did not differ between areas with and without terraces. In 2020/21, the terraced area had higher productivity. Regarding the off-season corn, no significant difference was observed. As the terraces in the assessed area were recently removed, it is still not possible to observe the influence of this practice on the physical-hydric properties of the soil and its effect on crop productivity, requiring further study.

Keywords: soy bean; corn; erosion; terrace; no-tillage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Georreferenciamento das megaparcelas com e sem terraços.	32
Figura 2. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mic) e macroporosidade (Mac) das megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT) em 2019, em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.	45
Figura 3. Resistência do solo à penetração (RP) e umidade volumétrica (θ_v) nas megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT) em 2019 e 2020, em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.....	48
Figura 4. Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) nas megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT) em 2019 e em 2020, em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.....	50
Figura 5. Precipitação mensal (mm) da média histórica (INMET, 2023) de Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil e durante os anos de 2019, 2020, 2021 e 2022 coletados pelo Grupo de Pesquisa em Ciência do solo, UTFPR campus Dois Vizinhos.	52
Figura 6. Produtividade da soja nos anos agrícolas 2019/20 e 2020/21 e do milho safrinha em 2021 nas megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT) em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição granulométrica e densidade de partículas das megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT), em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.....	41
Tabela 2. Indicadores estatísticos descritivos das propriedades físico-hídricas do solo das megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT), em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.....	43
Tabela 3. Indicadores estatísticos descritivos das propriedades físico-hídricas do solo das megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT), em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.....	47
Tabela 4. Diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DGP) do solo nas megaparcelas sem terraço (ST) e com terraço (CT), em 2020, em Dois Vizinhos, Paraná-PR, Sul.	51
Tabela 5. Indicadores estatísticos descritivos da produtividade das culturas nas megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT), em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
T	Tonelada
Há	Hectare
Cm	Centímetro
LiDAR	<i>Light detection and ranging</i>
VANTs	Veículo aéreo não tripulado
UTFPR-DV	Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Dois Vizinhos
M	Metro
Kg	Quilo
NPK	Nitrogênio- Fósforo- Potássio
°	Grau
'	Minuto
“	Segundo
SPD	Sistema de plantio direto
CT	Com terraço
ST	Sem terraço
°C	Graus Celsius
g	Gramma
cm ³	Centímetro cúbico
K _{sat}	Condutividade hidráulica
h	Hora
cm ²	Centímetro quadrado
Mg	Miligrama
m ³	Metro cúbico
Pt	Porosidade total
Mm	Micrometro
Mm	Milímetro
kPa	Quilopascal
Mi	Microporosidade
Ma	Macroporosidade
Ds	Densidade do solo
Dp	Densidade da partícula (método do balão volumétrico)
Dp _m	Densidade da partícula (método do balão volumétrico modificado)
Mb	Massa do balão volumétrico previamente aferido e seco
Mbs	Massa do balão com solo
°GL	Grau Lussac
Mbsa	Massa do balão contendo o solo mais o álcool foi aferida
Ma	Massa do álcool
Rpm	Rotação por minuto
mL	Mililitro
NaOH	Hidróxido de sódio
RP	Resistência a penetração
®	Registro
s	Segundo

Θ_v	Umidade volumétrica
DMG	Diâmetro médio geométrico
MS	Massa seca
D	Teste de Kolmogorov-Smirnov
χ^2	Teste de Barlett
$\log(y+1)$	Transformação logarítmica
LSD	<i>Least Significant Difference test</i>
CV	Coefficiente de variação
<	Menor que
>	Maior que
N	Número de observações
Mín	Mínimo
Máx	Máximo
S	Desvio padrão
s^2	Variância
As	Assimetria de Pearson
K	Curtose
MPa	Mega Pascal

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	História agrícola do Paraná.....	16
2.2	Solo e a erosão	17
2.3	Proteção do solo	19
2.4	Plantio direto.....	21
2.5	Rotação de culturas	23
2.6	Monitoramento e avaliação da erosão	24
2.7	Legislações.....	26
2.8	Comportamento físico-hídrico do solo.....	27
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1	Descrição da área experimental	29
3.2	Descrição das culturas.....	30
3.3	Pontos de amostragem	30
3.4	Caracterização físico-hídrica dos solos das megaparcelas.....	31
3.5	Condutividade hidráulica do solo saturado	33
3.6	Porosidade total	33
3.7	Microporosidade.....	34
3.8	Macroporosidade.....	35
3.9	Densidade do solo	35
3.10	Densidade de partículas	35
3.11	Distribuição granulométrica.....	37
3.12	Resistência do solo à penetração	37
3.13	Umidade volumétrica	37
3.14	Estabilidade de agregados do solo.....	38
3.15	Monitoramento pluviométrico	39
3.16	Produtividade das culturas nas megaparcelas.....	39
3.17	Análise estatística.....	39
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1	Propriedades físicas do solo	40
4.2	Comportamento pluvial	51
5.	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira teve um significativo incremento no que diz respeito ao desenvolvimento em função da produtividade de grande parte das culturas. Isso se deve, em parte, às inovações tecnológicas, provenientes do avanço das pesquisas. Altas produtividades e o uso de recursos de forma sustentável garantiram condições mais favoráveis para o avanço dessas tecnologias. O manejo do solo deve ser uma atividade implementada visando propiciar condições de desenvolvimento ideais às plantas. Com isso, a adoção do plantio direto foi uma conquista para a agricultura por reduzir a perda de solo causada pelo escoamento superficial da água das chuvas, além de aumentar o aporte de matéria orgânica pela decomposição de material vegetal. Isso possibilitou melhorias na fertilidade dos solos brasileiros, maior eficiência do uso da água, aumentando a produção de alimentos, sem utilizar maior quantidade de insumos agrícolas (CHAVEIRO *et al.*, 2022).

Além disso, a qualidade física do solo interfere no desenvolvimento das culturas, independente da água disponível, além de influenciar no fornecimento de água, oxigênio e resistência do solo à penetração. Fatores físicos estão relacionados à condição estrutural e ao teor de água no solo e pode ter impactos positivos ou negativos em relação à produtividade das culturas. Com isso, a avaliação das práticas de manejo sobre a qualidade do solo precisa levar em conta as premissas que determinam as condições físicas essenciais para o crescimento das plantas.

Assim, o conhecimento da influência do manejo nas propriedades físicas de solos é necessário para a manutenção da produtividade e para reduzir a degradação do ambiente (LAL, 2000). Porosidade total, macroporosidade e densidade do solo são propriedades físicas que controlam os movimentos de solutos e gases e crescimento de raízes (DANIELSON; SUTHERLAND, 1986; WAIRU; LAL, 2005) e influenciam também os processos hidrológicos e erosivos, pois alteram a capacidade de infiltração e a retenção de água (SILVEIRA, 2004, BRANDÃO, 2006), e assim, o escoamento superficial e a erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999; MIRANDA, 2008).

A erosão acontece quando há arraste e deposição de partículas de solo causada por água e/ou vento, de forma natural ou pela ação antrópica e é uma das principais causas de degradação dos solos no mundo, podendo ocorrer tanto em áreas não alteradas, quanto em uso intensivo (IONITA *et al.*, 2015; POESEN, 2018; GOUDIE, 2020). Os cultivos agrícolas podem, quando não manejados de forma adequada, prejudicar a sustentabilidade e causar a degradação dos solos e água. Assim, o equilíbrio entre a produtividade agrícola e a manutenção dos recursos naturais depende do uso, do sistema de manejo adotado e das práticas de cultivo.

A erosão pode gerar perdas de solos agricultáveis e assoreamento de cursos d'água e reservatórios, e por isso, entender suas causas ajuda na mitigação, bem como, na adoção de medidas visando conservação destes locais (BRADY, 1989; GUERRA, 2009; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010; GUERRA *et al.*, 2016). É fundamental o entendimento do processo erosivo causado pela chuva, propriedades do solo local e cobertura vegetal disponível que determinam as taxas de perda do solo, água e nutrientes que são essenciais para a conservação ambiental (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011; THOMAZ; VESTENA, 2012).

Por isso, sistemas conservacionistas que mantêm o solo protegido são essenciais, uma vez que, visam aumento da qualidade física, química e biológica do solo. O sistema de plantio direto, cujo objetivo é o de mitigar a erosão, pode aumentar a eficiência de produção, redução de custos e melhorar os recursos naturais (GASSEN, 2010). Outra prática conservacionista que pode garantir que a dinâmica da água seja suficiente para o adequado armazenamento no perfil do solo com o mínimo de perdas é o terraceamento, que visa minimizar o processo erosivo e é feito por meio da construção de terraços com o propósito de direcionar o volume de escoamento das águas das chuvas (MACHADO; WADT; 2021).

Apesar disso, a mecanização com máquinas cada vez mais pesadas e a maior intensidade de uso do solo, mesmo no sistema de semeadura direta, promovem efeitos negativos na estrutura do solo (SILVA *et al.*, 2003) e aumento da compactação (DIAS JÚNIOR, 2000). Quando o tráfego de máquinas ocorre em determinada condição de umidade, pode-se superar a capacidade de suporte desses solos, promovendo a deformação plástica e o aumento do estado de compactação do solo (HÄKANSSON; VOORHESS, 1998; COLLARES *et al.*, 2008). Com isso, é preciso que seja monitorado o grau de interferência dessas práticas nas características do solo e as tendências de comportamento ao longo do perfil, pois com o processo erosivo, pode

haver intensificação da desagregação das partículas do solo e seu transporte, causando acúmulo nos espaços porosos, reduzindo o diâmetro dos mesmos, acarretando em menor porcentagem de macroporosidade e maior de microporos, o que dificulta o movimento da água, reduzindo a condutividade hidráulica do solo saturado.

Como a erosão é um processo dinâmico e dependente das condições climáticas locais e manejo adequado, o monitoramento deve ser feito de forma contínua. Monitorar esse fenômeno é fundamental para adoção de estratégias integradas dos recursos naturais, embora ainda os estudos acerca do monitoramento sejam pouco conclusivos pela individualidade e limitação dos procedimentos experimentais adotados (KUHN; GREENWOOD; FISTER, 2014; BOARDMAN; EVANS, 2019). Assim, o presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento físico- hídrico do solo em área com terraços e área onde os terraços foram retirados, com o propósito de mensurar o reflexo disso na produtividade das culturas de soja e milho na região sudoeste do Paraná.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 História agrícola do Paraná

O Brasil, a princípio, compreendia a plantação de cana de açúcar, café e algodão, baseado na exploração intensiva das terras e contava com a mão de obra escrava (KLANOVICZ; MORES, 2017). Com a abolição da escravidão, até a década de 30, as fazendas cafeeiras eram responsáveis pela exportação e os donos das propriedades alugavam a terra ao redor das lavouras cafeeiras para que os colonos produzissem outras culturas e garantissem seu sustento (VAZ, 2015). Assim, até meados da década de 70, na região do Paraná, a agricultura familiar era a base agrícola utilizada como moeda de troca (KISCHENER *et al.*, 2015).

Os primeiros ocupantes das terras paranaenses foram os caboclos e indígenas, de acordo com Santos (2008), nômades e que valiam de técnicas primitivas como uso do fogo, com alternância de terras para obtenção de recursos agrícolas, não tendo possibilidade de formação de patrimônios ou posse de áreas para produção. Eles viviam da coleta e extração de materiais, caça e pesca e a capitalização de recursos que deu início pela criação de suínos, venda de couro e erva mate, e se intensificou com o início da migração de gaúchos e catarinenses (SANTOS, 2008).

Durante a década de 40, a população paranaense cresceu demasiadamente pela migração de fundiários do Rio Grande do Sul. O estado era favorável para a produção de grãos nas áreas menos íngremes (SANTOS, 2008). Esse cenário começou a mudar em meados da década de 50, com a conhecida “Revolta dos Posseiros de 1957”, quando a demarcação e titulação de terras foram consolidadas, o que desencadeou o desenvolvimento regional (KISCHENER *et al.*, 2015). Isso resultou na regularização de centenas de pequenos proprietários que possuíam poucos hectares, e dezenas de grandes latifundiários (KISCHENER *et al.*, 2015).

Essa regularização trouxe um novo pensar sobre a agricultura, pois a produção baseada em milho e soja era destinada ao consumo humano e animal, e o excedente era comercializado, até então, com certa dificuldade devido escassez de meios de transporte (SANTOS, 2008). Com a venda do excedente, aumentou a pressão pela padronização do produto e aumento do custo de produção e, com isso, houve a implementação de políticas econômicas de incentivo ao cultivo de fumo, milho e soja, além da necessidade de tecnificação para atender as exigências

do mercado (MONDARDO, 2011). A diversificação agrícola de cultivares evoluiu, também, passando a ser a maior *commodity* cafeeira do país, e em 1975, com a grande geada que destruiu os cafezais, a substituição pelas culturas de milho e soja foi necessária (TELLES *et al.*, 2012).

A nível estadual e nacional, houve uma modernização da agricultura, permitindo uma visão industrial do campo aos proprietários modificando a base técnica de produção (SANTOS, 2008). Além disso, o método de produção, que até então usava a força animal e a mão de obra exclusivamente humana, passou a usar ferramentas manuais como arado, foice e machado, para se valer da tecnologia de máquinas e insumos modernos, adquiridos, quase em sua totalidade, por meio de sistemas de crédito que não eram comuns aos pequenos proprietários da época, favorecendo os latifundiários (MONDARDO, 2011).

Assim, a emergência de monoculturas foi caracterizada como símbolo do desenvolvimento da agricultura na região sul do país, como a fruticultura e lavouras de trigo e soja, todas tendo a mecanização, o uso intensivo da terra e de produtos químicos no campo como elementos essenciais para essa mudança. Com isso, nas últimas décadas, a agricultura tem se baseado na sucessão, principalmente de soja e milho, que vem modificando a história agrícola paranaense (KLANOVICZ; MORES, 2017).

2.2 Solo e a erosão

O solo refere-se a um recurso natural, representado pela camada mais externa da terra, composta por minerais soltos, materiais orgânicos, água e gases. Tem função biológica, atuando na infiltração da água, acúmulo de matéria orgânica e nutrientes, habitat para seres vivos e suporte da fauna (BOCALETI *et al.*, 2021). Segundo Back *et al.* (2021), é considerado não renovável, devido a lenta taxa de desenvolvimento.

De acordo com a Embrapa (2018) solo é:

“[...] uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem e, eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas”.

A erosão dos solos é cíclica, equilibrada e pode transformar a paisagem. No entanto, a ação antrópica está modificando o equilíbrio do processo erosivo, aumentando a degradação (MAFRA, 2009, BLUM; SCHAD; NORTCLIFF, 2018). A erosão intensificada dos solos

caracteriza-se, atualmente, como um grande problema ambiental e agrícola. Autores como Pimentel *et al.* (1995), Vidal-Torrado (2005) e Miklos (1993) calcularam que todos os anos, cerca de 12×10^6 hectares de terras têm utilização incapacitada ou são abandonadas, além disso, observaram que foram transportados apenas pela erosão hídrica cerca de 1 bilhão de toneladas de materiais provenientes de áreas agrícolas, em 2001 (CALDAS; SILVA; SANTOS, 2019).

Os solos agricultáveis têm uma importância tanto na esfera econômica quanto social e cultural de uma região, estado e/ou país. O Brasil, por exemplo, retém em torno de 20% do solo agricultável de todo o mundo, que sofrem com desgaste anual, devido ao manejo inadequado (BACK *et al.*, 2021). A degradação do solo pode ser definida como toda e qualquer alteração física, química ou biológica que possa ocorrer tanto de forma natural, quanto por intervenções antrópicas, como durante a prática agrícola. As lavouras, por exemplo, podem impactar o solo de maneira negativa podendo causar escoamento superficial e erosões (BOCALETI *et al.*, 2021), quando não bem manejadas.

Assim, quando a utilização, ocupação e manejo do solo não é acompanhado por práticas conservacionistas e métodos mitigadores de impactos ambientais, os processos erosivos são favorecidos, provocando a perda de solo fértil, além do transporte de defensivos, nutrientes e sedimentos, podendo acarretar a degradação dos recursos naturais (FLAUZINO, 2012). Além disso, pode haver redução no sequestro de carbono (FAO, 2017; LAL *et al.*, 2018; NACHTIGALL *et al.*, 2020). No Brasil, a erosão hídrica é a que mais causa degradação do solo, com estimativa do volume de solo perdido variando de 0,1 a $136,0 \text{ t ha}^{-1}$ (ANACHE *et al.*, 2017). A erosão ocorre pela ação da água das chuvas, vento e ações mecânicas, que além de reduzir a produtividade do solo, faz com que detritos e partículas, incluindo fertilizantes e outros compostos utilizados na agricultura, sejam carregados até os rios e nascentes (BACK *et al.*, 2021). De acordo com a FAO (2015), o solo está propenso à erosão hídrica devido à capacidade erosiva das chuvas, a posição e inclinação da encosta na bacia hidrográfica e a cobertura vegetal. Solos com maior quantidade de argila e matéria orgânica são mais resistentes do que os mais arenosos, e por isso a infiltração e o desprendimento de partículas são facilitados em solos arenosos.

Um estudo realizado por Nachtigall *et al.* (2020) demonstrou que a erosão possui relação sazonal com as atividades agrícolas pelo tempo em que o solo fica exposto entre a colheita e a semeadura das culturas, enquanto as estações do ano definem o volume de chuva.

No caso do Paraná, por exemplo, se observam chuvas mais intensas no período do verão, onde a gota da chuva tem maior potencial erosivo. Além de outros fatores, a aeração do solo afeta diretamente a capacidade da planta de absorver água e nutrientes. Em condições de aeração inadequada, a eficiência da maioria das culturas agrícolas na absorção de nutrientes é baixa. Como a aeração está diretamente relacionada com a quantidade e tamanho dos poros que, por sua vez, estão correlacionados com a umidade do solo, o manejo do solo vai afetar essas condições e, assim, impactar na absorção.

2.3 Proteção do solo

Existem duas grandes formas de proteção dos solos, sendo a primeira forma relacionada as propriedades nutricionais ou biológicas do mesmo, e a segunda, a proteção mecânica, evitando a erosão (BOCALETI *et al.*, 2021). As práticas de terraceamento são usadas desde a antiguidade nas atividades agrícolas em todo o mundo para reduzir o processo erosivo do solo (TAROLLI *et al.*, 2018), pois são barreiras mecânicas construídas de forma contrária ao desnível que o terreno possui para interceptar o fluxo de água, e com isso, geram diversos benefícios como diminuição do escoamento superficial, mitigação da erosão, aumento da infiltração, redirecionamento da água superficial e melhora na retenção de água (FERRO-VÁZQUEZ *et al.*, 2017).

O tipo adequado de terraço a ser implantado deve ser escolhido a partir da análise das características da chuva como quantidade, intensidade, duração e frequência, e do solo, como a profundidade, textura e permeabilidade (PRUSKI, 2009). Assim, há o terraço de retenção, infiltração ou em nível que é construído com o canal em nível e as extremidades bloqueadas, reterendo a água que vem do escoamento superficial para que seja infiltrada no canal (PRUSKI, 2009). O terraço de drenagem ou gradiente é construído com canal em declive visando conduzir a água (PRUSKI, 2009) e o terraço misto pode ser construído com o canal em nível podendo reter o escoamento superficial, assim, após essa retenção e preenchimento do espaço, passa a funcionar como um terraço de drenagem (PRUSKI, 2009).

Back *et al.* (2021) relatam que o terraceamento pode ser potencializado quando combinado a outras práticas de conservação, como a adoção do sistema de plantio direto, promovendo uma cobertura do solo, calagem e adubação, rotação de culturas com plantas

capazes de produzir alta matéria orgânica, como leguminosas, cultivo em contorno e com isso, é possível garantir um planejamento conservacionista da área (MACHADO; WADT; 2021).

Com o passar dos anos, baseados em estudos empíricos, houve um desestímulo do uso do terraceamento, indicando que no plantio direto proporcionava redução da degradação do solo. Aliado a isso, entendia-se que os terraços geravam certa dificuldade na mecanização e reduziam a área cultivada, levando alguns produtores a eliminar ou diminuir consideravelmente seu uso (BACK *et al.*, 2021). No entanto, em solos sob plantio direto a presença de palha pode aumentar a rugosidade do terreno, estabilizar os agregados do solo e assim, reduzir a desagregação das partículas, resultando em maiores taxas de infiltração e diminuição do volume de escoamento da água pela enxurrada. Em algumas situações, pode ocorrer a remoção da palhada pela enxurrada, aumentando a perda de água e de matéria orgânica, mesmo que se perca pouco solo (MACHADO; WADT, 2021). Assim, há um grande equívoco em se afirmar que lavouras sob sistema plantio direto não necessitam de terraceamento, pois além da palhada aumentar a velocidade de infiltração e diminuir a desagregação do solo, ela não reduz completamente a enxurrada e assim, a maior rugosidade do terreno e menor desagregação das partículas do solo. Assim, a maior rugosidade do terreno e menor desagregação dos agregados do solo sob sistema plantio direto contribuem para o maior espaçamento entre terraços, mas não permitem sua eliminação (MACHADO; WADT; 2021).

A manutenção dos restos culturais em superfície reduz a erosão e proporciona maior acúmulo de matéria orgânica, bem como, favorece o aumento da atividade microbiana, facilitando o acesso de nutrientes disponíveis para a absorção pelas plantas (RHEINHEIMER *et al.*, 2019) além de reduzir o número de plantas daninhas que competem por água, luz e nutrientes com as espécies de interesse econômico. Além disso, o uso da rotação de culturas melhora as condições físicas, químicas e biológicas do solo, promovendo condições favoráveis para as plantas se desenvolverem adequadamente (SANTOS; TOMM, 1999). O conjunto desses fatores torna o plantio direto importante para a manutenção da agricultura sustentável (ROMDHANE *et al.*, 2019).

Autores como Telles *et al.* (2012) ressaltam que é importante o estímulo público para conscientização ambiental, adotando técnicas de conservação de solo que diminuam ou evitem a erosão hídrica, visto que os prejuízos causados por ela são significativos e sua ocorrência é permanente. Frente a esse cenário, surgiram ações governamentais como da Secretaria do

Estado de Santa Catarina, que entre a década de 70 e 90, criou e implantou programas de recuperação do meio ambiente visando estimular o produtor a aderir práticas de manejo para conservação do solo, incentivando o uso de terraços (BACK *et al.*, 2021, *apud* BACK; FONTANA; CITTADIN, 2000). O estado do Paraná, por exemplo, entre 1976 e 1979 implementou o Programa Integrado de Conservação dos solos (PROICS), que adota práticas de conservação de solo com métodos mecânicos, visando a demarcação e uso do terraceamento. Esse programa foi instaurado em cerca de 72 mil propriedades rurais, atingindo quase 2,5 milhões de hectares em 130 municípios do estado (TELLES *et al.*, 2012).

2.4 Plantio direto

A erosão do solo no Brasil tornou-se preocupante nos sistemas de preparo convencional, a partir da década de 1970. A excessiva mobilização do solo, por meio de arações e gradagens acarretou degradação ambiental intensa (KIELING, 2007). Essas práticas objetivam preparar o solo antes da semeadura, favorecer o desenvolvimento da planta e fazer o controle de plantas daninhas, no entanto, podem desestruturar, compactar e impermeabilizar o solo, reduzindo a matéria orgânica, a infiltração de água da chuva e irrigação e, conseqüentemente, limita o crescimento das raízes (GASSEN; GASSEN, 1996). Com isso, ocorre erosão, causando perdas de solo e nutrientes, bem como redução da retenção de umidade e da atividade biológica (VARGAS; HUNGRIA *apud* LANA, 2007). Devido a isso, medidas conservacionistas, a fim de minimizar essas perdas, passaram a ser adotadas, como uso de terraços, plantas de cobertura e rotação de culturas.

No entanto, essas práticas adotadas não foram tão eficazes para a solução do problema da erosão em sistemas de preparo convencional (KIELING, 2007) e por isso, além do terraceamento, outra forma de proteção de solo passou a ser usada, o plantio direto, que surgiu com o objetivo de evitar esse fenômeno erosivo e se consolidou graças aos seus benefícios, como aumento na eficiência de produção, redução de custos, melhora dos recursos naturais (GASSEN, 2010), redução de erosão e compactação do solo, possibilidade de semeadura na época adequada, maior retenção de umidade no solo, aumento da resposta da cultura às chuvas após um período de seca, melhora na germinação de sementes e emergência das plantas (BRSCAN; LAMOGIA; OLIVEIRA, 2015); diminuição do uso da mecanização; aumento de cobertura vegetal sobre o solo, o que contribui para menor evapotranspiração, regulação térmica

pela palhada, controle de plantas daninhas, aumento de matéria orgânica, aumento da microbiota para ciclagem de nutrientes (LIMA *et al.*, 2012).

Os primeiros trabalhos envolvendo a possibilidade de semeadura direta surgiu na estação de Rothamsted, na Inglaterra em meados da década de 30. Porém, o maior problema era o controle das plantas invasoras, que só viria a tornar-se possível em 1956 com a descoberta do Diquat e Paraquat. Cardoso (2000) redigiu um informativo relacionado a evolução do plantio direto relatando que na década de 60 teve início nos Estado Unidos da América (EUA) o chamado “cultivo zero”, feito em solo não mexido e coberto por palhada. No Brasil, esse sistema de plantio só passou a ser utilizado a partir de 1971, em Rolândia, no Centro-Sul do estado do Paraná, em uma fazenda de propriedade de Herbet Bartz que teria sido dizimada após uma tempestade, sendo necessário recorrer a novas soluções para a lavoura. Ao mesmo tempo, na cidade de Ponta Grossa, a mesma tecnologia foi incorporada nas fazendas de propriedade de Frank Dijkstra, seguindo o modelo estadunidense (CARDOSO, 2000).

MUZILLI *et al.* (1983) citam que:

“As primeiras experiências com plantio direto iniciaram no Estado do Paraná, em 1971. Tanto por parte da pesquisa, como por parte dos agricultores, a experiência acumulada se refere à sucessão trigo-soja, as culturas mais difundidas em plantio direto no sul do Brasil.”

O plantio direto é uma técnica de cultivo que visa o mínimo revolvimento de solo e manutenção dos restos culturais em superfície, principalmente pela diversificação de espécies vegetais pela rotação de culturas (PÖTTKER; BEN, 1998). A técnica, introduzida no Brasil por agricultores na região dos Campos Gerais, Paraná, na década de 1970, mostrou uma melhora na redução da erosão hídrica e nos custos de produção (BOLLIGER *et al.*, 2006) e por isso, o plantio direto passou a ser utilizado rapidamente na região, mas somente 20 anos mais tarde o país expandiu em milhares de hectares cultivados sob este sistema de cultivo (FEBRAPDP, 2019).

Em estudos realizados ainda em 1976, no Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), cultivares plantadas sob sistema de plantio direto desenvolveram-se melhor quando comparadas com o sistema convencional, pela maior umidade na camada de 0-10 cm e redução das perdas por erosão em casos de chuvas e ventos fortes, graças a firmeza das raízes ao solo e alto teor de matéria orgânica, consolidando ainda mais esse sistema de plantio (MUZILLI *et al.*, 1983).

Muitos são os benefícios do plantio direto como a redução do processo erosivo, a descompactação do solo, aumento da fertilidade, da quantidade de nutrientes e da concentração de nitrogênio no solo, devido à decomposição da matéria orgânica e à rotação de culturas, indicando a importância desse sistema de plantio na recuperação e manutenção do solo (SALOMÃO *et al.*, 2020). Inicialmente, o plantio direto passou a ser utilizado visando manejo da erosão hídrica e redução da degradação do solo provocada por métodos de cultivo com preparo intensivo (OGLE *et al.*, 2019; MEYER, 2021) e, atualmente, esse sistema é considerado uma forma mais sustentável de manejo e conservação do solo, além dos menores custos com utilização de insumos e dos benefícios para o ecossistema, visto que, os restos culturais dispostos na superfície do solo contribuem para sua proteção a erosão, reduz o escoamento superficial, o transporte de sedimentos e nutrientes (MCLAUGHLIN; CAMPBELL; MEYER, 2021) e tem influência nas propriedades físicas do solo como densidade, taxa de infiltração de água, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, condutividade hidráulica e resistência à penetração (KAZMIERCZAK, 2018).

Como a compactação aumenta a densidade do solo, reduzindo o volume de poros, o processo erosivo é favorecido, afetando negativamente a condutividade hidráulica e o desenvolvimento radicular das plantas (SHI *et al.*, 2012). Assim, a adoção de sistemas de rotação de culturas com plantas alta produção de biomassa e sistema radicular profundo pode ser uma maneira de auxiliar na descompactação do solo (MORAES, 2013).

2.5 Rotação de culturas

Rotação de culturas é um sistema de plantação alternada de espécies, em sequência, no mesmo espaço, de forma que a mesma espécie vegetal não seja cultivada consecutivamente, evitando a degradação do solo e garantindo maior produtividade e rentabilidade agrícola (SACHETTI, 2020). Sistemas de rotação de culturas influenciam de forma favorável os processos químicos, físicos e biológicos das propriedades do solo, que variam de acordo com a escolha de espécies vegetais, sequência de cultivos, período de resistência dos restos culturais e seus efeitos sobre o solo (LI *et al.*, 2019; SÁNCHEZ-NAVARRO *et al.*, 2019). Esse sistema altera a dinâmica de pragas, doenças, plantas daninhas e nematoides, afetando o desenvolvimento das culturas (WEISBERGER; NICHOLS; LIERBMAN, 2019). No entanto, quando se repete o mesmo sistema ao longo de anos o desenvolvimento de doenças, pragas e

plantas daninhas, bem como degradação do solo, podem ser favorecidos, resultando em redução da produtividade (SAN MARTÍN *et al.*, 2019; JAT *et al.*, 2019; CANALLI *et al.*, 2020).

Assim, rotação de culturas sob sistema de plantio direto é visto como um meio para o desenvolvimento bem-sucedido da agricultura sustentável (BOWMAN; ZILBERMAN, 2013). Além disso, esse sistema mais diversificado pode ser economicamente mais vantajoso do que sistemas menos diversificados. As espécies utilizadas para rotação de culturas devem ser capazes de recuperar o solo e ter valor comercial agregado (ABREU *et al.*, 2016; CANALLI *et al.*, 2020).

De acordo com Gassen (2010), no período entre as safras, em casos que não seja possível realizar safrinha, é recomendado fazer uso de espécies de plantas de cobertura para proteção do solo exposto e, com isso, pode-se obter maior quantidade de nutrientes como carbono e nitrogênio provenientes da decomposição das culturas, gramíneas e leguminosas, que produzem biomassa suficiente para manter a matéria orgânica e o sistema como um todo (SALOMÃO *et al.*, 2020). Um planejamento de rotatividade adequado permite o uso de espécies vegetais com variado sistema radicular que mobilizam profundidades diferentes e fazem com que nutrientes existentes nas mais diversas camadas do solo sejam utilizados e renovados (SACHETTI, 2020).

Salomão *et al.* (2020) enfatiza que:

“O plantio direto apresenta inúmeros benefícios, porém para seus efeitos serem sentidos de fato é preciso a realização de uma rotação de cultura. Essa rotação de cultura garante a manutenção dos nutrientes disponíveis, mantendo um equilíbrio do solo.”

Assim, uma das estratégias do plantio direto é a adoção da rotação de culturas, alternando culturas comerciais, como soja, milho, arroz, com adubos verdes e gramíneas, visando cobertura do solo, reciclagem de nutrientes e aumento na produtividade das culturas em sucessão (SILVA *et al.*, 2006), uma vez que a camada de palha que permanece sobre o solo garante fixação para a próxima cultura, possibilitando um sistema mais sustentável e conservacionista (ANSELMO; COSTA; SÁ, 2014).

2.6 Monitoramento e avaliação da erosão

Monitorar diz respeito à mensuração sistemática de um processo, por meio da coleta de dados, considerando intervalos de tempo (KUHN; GREENWOOD; FISTER, 2014;

BOARDMAN; EVANS, 2019). Ao fazer o monitoramento da erosão, há um período para a ocorrência desse processo que depende do momento, quantidade e intensidade de chuva, além do início e duração de tal, das características do solo e da área circundante (BOARDMAN; FAVIS-MORTLOCK, 2014; GUERRA, 2016).

Existem inúmeras técnicas para avaliação e monitoramento da erosão. Guerra (2005) destaca que as principais e mais utilizadas são as estações experimentais, monitoramento de voçorocas e pinos de erosão que são baseadas na mensuração da intensidade de chuvas e das perdas de solo em determinada área. Diversos autores citam como métodos convencionais mais utilizados o uso de estaca ou pinos de erosão, possivelmente devido à facilidade na execução e relação custo-benefício, sendo a primeira utilizada para monitoramento de voçorocas, e a segunda na verificação da perda ou acúmulo de detritos em diversos ambientes (GUERRA, 2005; LOUREIRO *et al.*, 2022; NACHTIGALL *et al.*, 2020).

A parcela de erosão é um instrumento capaz de mensurar elementos que se deslocam, especialmente as partículas de solo e água, sendo um eficiente método de análise geomorfológico para entender o processo erosivo. A técnica faz o monitoramento por meio de medições específicas de determinada área, como escoamento superficial, fazendo coletas de indicadores e parâmetros para averiguar impactos ambientais como o total de água e solo que foram escoados por erosão, dimensionando o processo erosivo acelerado e avaliando a eficácia de medidas preventivas que estão sendo adotadas (BITAR; ORTEGA, 1998; GUERRA, 2005; ROSS; FIERZ, 2009; GUERRA, 2016; PEREIRA, 2019).

Loureiro *et al.* (2022) indica o uso de métodos digitais de monitoramento conhecidos como geotecnologias na mensuração das erosões hídricas. Essas geotecnologias utilizam no monitoramento da erosão hídrica técnicas e *softwares* voltados ao mapeamento, por meio de imagens de satélite, radares, LiDAR (*Light Detection and Ranging*) terrestre ou aerotransportado e veículos aéreos não tripulados (VANTs), que facilitam o trabalho de monitoramento da degradação do solo (LOUREIRO *et al.*, 2022).

Embora o monitoramento contínuo contribua para o entendimento da dinâmica de água no perfil do solo, o movimento, a geração e a propagação do escoamento superficial e lateral da água e o efeito dos escoamentos sobre a erosão do solo em escala de parcela, para diferentes posições na paisagem e para outras escalas de análise ainda são pouco conhecidos. Assim, os estudos de monitoramento são fundamentais para a gestão integrada dos recursos naturais, mas

ainda são pouco conclusivos devido à individualidade e limitação dos procedimentos experimentais adotados.

2.7 Legislações

Os solos paranaenses possuem uma grande variabilidade, havendo 224 unidades de solo em classificados em 20 diferentes classes e se diferenciam, na textura, estrutura, estabilidade dos agregados sob água, profundidade, saturação, capacidade de infiltrar e reter água, gradiente textural, presença ou ausência de pedras e falta ou excesso de água. Com isso, esses solos diferem entre si no que diz respeito à sua utilização para a agricultura ou à mecanização (EMBRAPA, 2008).

A erodibilidade dos solos paranaenses também é distinta entre eles, mudando a suscetibilidade da degradação por erosão hídrica (PERCIRA *et al.*, 1992; GASPARETTO, 1999). Assim, um solo pode ser caracterizado como tendo alta suscetibilidade à erosão quando há baixa infiltração e baixa estabilidade dos agregados na presença de água. Mesmo solos que possuam baixa erodibilidade, quando manejados de forma errônea, sem adoção de práticas conservacionistas, podem ser degradados por erosão hídrica (TELLES *et al.*, 2012; BERTOL *et al.*, 2016).

Há pelo menos quatro décadas o estado do Paraná vem adotando medidas para conter a degradação do solo e da água, principalmente aquelas decorrentes da erosão hídrica. Para isso, 10 programas de governo foram conduzidos, sendo que recursos internacionais foram aplicados em quatro destes e os outros seis, desenvolvidos com recurso estadual. No início dos anos 70, as primeiras iniciativas foram adotadas devido aos danos significativos que a erosão estava causando aos solos, porém, o desconhecimento desse processo erosivo e seus efeitos no solo, bem como sobre quais medidas seriam adequadas para mitigar as consequências desse fenômeno, fez com que as estratégias adotadas não surtiram o êxito esperado, visto que, as estratégias se destinavam a controlar mais os efeitos do que as causas (BERTOL *et al.*, 2016).

O uso de uma única prática conservacionista, no caso o terraceamento foi um dos motivos da baixa eficiência, uma vez que, essa prática tem como objetivo principal dividir a encosta, controlando apenas o transporte e deposição dos sedimentos, pela detenção do escoamento superficial e seu armazenamento, não tendo efeito sobre a desagregação provocada pela gota da chuva, por exemplo (BERTOL *et al.*, 2016).

Durante a década de 1980, programas de manejo da erosão foram adotados, empregando estratégias inovadoras e que, dessa vez, foram eficientes para o controle da erosão hídrica, como a concentração de esforços em “microbacias”; integração de instituições e integração de práticas conservacionistas, como o terraceamento. O sistema de plantio direto foi impulsionado nesta época, sendo adotado em cerca de 70% da área sob cultivo anual (BERTOL *et al.*, 2016). Assim, o solo paranaense passou por diversas mudanças com o passar do tempo, principalmente quando se refere ao uso do mesmo para produção agrícola. As culturas principais variaram significativamente, além do método intensivo de utilização para propiciar uma maior produção.

Ao longo dos anos, esses métodos de tratamento do solo trouxeram diversas alterações e conseqüente preocupação com a degradação do solo. Como exemplo dessa preocupação, pode-se citar inúmeras leis, como a n^o Lei n^o 8014/1984, de 14 de dezembro de 1984 (BRASIL, 1984), que trouxe providências a serem tomadas por todos aqueles que se utilizassem do solo agrícola, prevendo controlar a erosão do solo, evitar a desertificação e assoreamento dos rios.

No âmbito nacional, a preocupação com o meio ambiente pode ser registrada desde 1965, com a criação do Código Florestal, que instituiu normas para ocupação e utilização do solo, e já nesta data se falava sobre o controle da erosão (BRASIL, 2012). Surgiram leis para a punição quando crimes ambientais fossem identificados, como o previsto na Lei número 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 (BRASIL, 1998).

2.8 Comportamento físico-hídrico do solo

As raízes são responsáveis por funções vitais e por isso, um ambiente radicular adequado é essencial para que haja água e oxigênio disponíveis. Fotossíntese, respiração, transpiração e todo o crescimento e desenvolvimento da planta dependem da relação solo-planta-água, implicando nas propriedades do solo, principalmente em suas propriedades físicas, para que haja altas produtividades. Os agregados são importantes para a retenção e fluxo de água e ar no solo e são formados por meio de partículas minerais, material orgânico, elementos químicos e organismos. Além disso, podem proporcionar uma condição física favorável ao desenvolvimento da soja, uma vez que permite a entrada e circulação de água e ar (HILLEL, 1998).

Para que haja uma absorção de água e nutrientes pelas raízes, é preciso que não haja interferências mecânicas para o desenvolvimento do sistema radicular na parte superficial do solo, que é a camada mais ativa no solo de lavoura sob sistema plantio direto, devido ao acúmulo de carbono orgânico nessa camada. O sistema radicular da cultura da soja tem seu crescimento via macroporos, pela menor resistência à penetração das raízes e maior disponibilidade de oxigênio (TORRES; SARAIVA, 1999). Mas para que haja água às raízes é preciso que tenha retenção de água no solo, que ocorre em poros menores (LIBARDI, 2005) e, por isso, é necessário que o solo tenha poros de retenção suficientes para que haja disponibilidade de água ao sistema radicular.

As operações de manejo em áreas sob plantio direto são capazes de reduzir a porosidade do solo, especialmente de macroporos (RICHART *et al.*, 2005; WENDLING *et al.*, 2012; ORTIZ, 2019), responsáveis também pela aeração e drenagem de água (REICHERT *et al.*, 2007) e, assim, sua redução pode diminuir também a condutividade hidráulica e o acúmulo de água (RICHART *et al.*, 2005).

Assim, plantas de cobertura que são disponibilizadas quando se usa o sistema de plantio direto, podem criar poros biológicos altamente funcionais (REINERT *et al.*, 2008), além de aumentar a atividade biológica do solo (LIMA *et al.*, 2005). Esses poros mobilizam mais nutrientes, principalmente aqueles absorvidos por fluxo de massa (ORTIZ, 2019).

Em sistemas de plantio direto as cavidades proporcionadas pelos poros biológicos, aumentam em função da compactação, pois quando há resistência do solo, as raízes tendem a seguir estes caminhos (TORRES; SARAIVA, 1999; LOZANO *et al.*, 2014). Assim, a porosidade total do solo no sistema plantio direto deve ser levada em consideração quando os valores de densidade do solo tendem a aumentar, reduzindo a macroporosidade e aumentando a microporosidade (ORTIZ, 2019).

Com isso, visando alta produtividade de soja, o ideal é que haja um fluxo de água e ar no solo, que dependem de macroporos, poros biológicos e uma continuidade de poros para que possibilitem um bom fluxo de água (HORN, 1990; ORTIZ, 2019).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido durante as safras 2019/20 e 2020/21 nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-DV), no município de Dois Vizinhos, localizado na região sudoeste do estado.

As áreas experimentais foram denominadas como “megaparcelas”, que tinham dimensão de 1,923 ha cada e estavam localizadas em 25°42’3” de latitude Sul, 53°5’57” de longitude Oeste e altitude 510 metros, ao ponto extremo norte entre megaparcelas, que por sua vez representa o ponto mais baixo em relação ao relevo do talhão (Figura 1).

O sistema de cultivo nas megaparcelas vêm sendo submetido a sucessões de culturas usuais da região sudoeste do Paraná, tais como, soja (*Glycine max* (L.) Meer.), milho (*Zea mays* L.) e aveia (*Avena sativa* L.), em um sistema de semeadura direta, popularmente conhecido como plantio direto (SPD). Todos os tratos culturais e operações agrícolas foram realizadas do mesmo modo para ambas as áreas estudadas.

A diferença entre as áreas era a presença de terraços como forma de controle mecânico do escoamento superficial de água (com terraços- CT) e a inexistência destes (sem terraços-ST). Os terraços têm origem anterior à ocupação da área experimental pela UTFPR-DV (BATTISTI, 2020) e foram, em uma das partes, retirados em maio de 2019 para consolidação da megaparcela sem terraço. As áreas CT e ST tinham declividade média de 8,98 e 8,62% e comprimento de rampa de 203,60 e 206,50 metros, respectivamente.

O clima na região foi classificado como Cfa, subtropical úmido, sem estação seca definida, com média superior 22 °C no mês mais quente e inferior a 18 °C no mais frio, com chuvas bem distribuídas nas quatro estações do ano, com um acumulado médio entre 1900 e 2200 mm por ano (ÁLVARES *et al.*, 2013).

A erosividade média da região varia de 10.000 a 12.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, tendo maiores chances de ocorrência deste processo no mês de janeiro, diminuindo de forma geral até o mês de agosto, onde tende a aumentar até janeiro do ano seguinte (WALTRICK *et al.*, 2015).

O solo da área experimental foi classificado como NITOSSOLO VERMELHO (CABREIRA, 2015), com teores médios de argila, silte e areia de 0,70, 0,28 e 0,02 kg kg⁻¹, respectivamente, e densidade de partícula de 2,89 g cm⁻³ na camada de 0,00-0,15 m (GUGEL *et al.*, 2017).

3.2 Descrição das culturas

A soja (*Glycine max* (L.) Meer.), cultivar Dom Mario 5958, para o experimento da safra 2019/20 foi semeada em 24/10/2019 com densidade de 13,2 sementes m⁻¹ e espaçamento de entre linhas de 0,45 m, adubação de 250 kg ha⁻¹ da formulação comercial de NPK 2-18-18. Para o experimento da safra 2020/21 se utilizou a cultivar Pioneer 95R51, densidade de 15,4 sementes m⁻¹ e espaçamento de entre linhas de 0,45 m, adubação de 250 kg ha⁻¹ de NPK 2-20-20, semeada em 12/10/2020.

O milho (*Zea mays* L.) safrinha, subsequente à soja, foi semeado na segunda quinzena de fevereiro de 2021, com 0,45 m de espaçamento entre linhas e densidade de 2,7 sementes m⁻¹, onde se utilizou o híbrido Pioneer 3016 VYHR e adubação de 350 kg ha⁻¹, formulação comercial de NPK 10-26-14, sequenciando aplicação de 400 kg ha⁻¹ de nitrogênio em formulação de 46-0-0, quando as plantas atingiram estágio V8 (vegetativo 8).

No intervalo das culturas de interesse neste estudo, foi plantado feijão safrinha, semeado em 5 de fevereiro de 2020, variedade IPR SABIÁ e foi feita uma adubação de 250 kg ha⁻¹ de 8-10-20, e aveia, semeada em 3 de julho de 2020, variedade BRS 139 e não foi feita adução. Essas culturas foram semeadas visando cobertura do solo na entre safra das culturas comerciais.

3.3 Pontos de amostragem

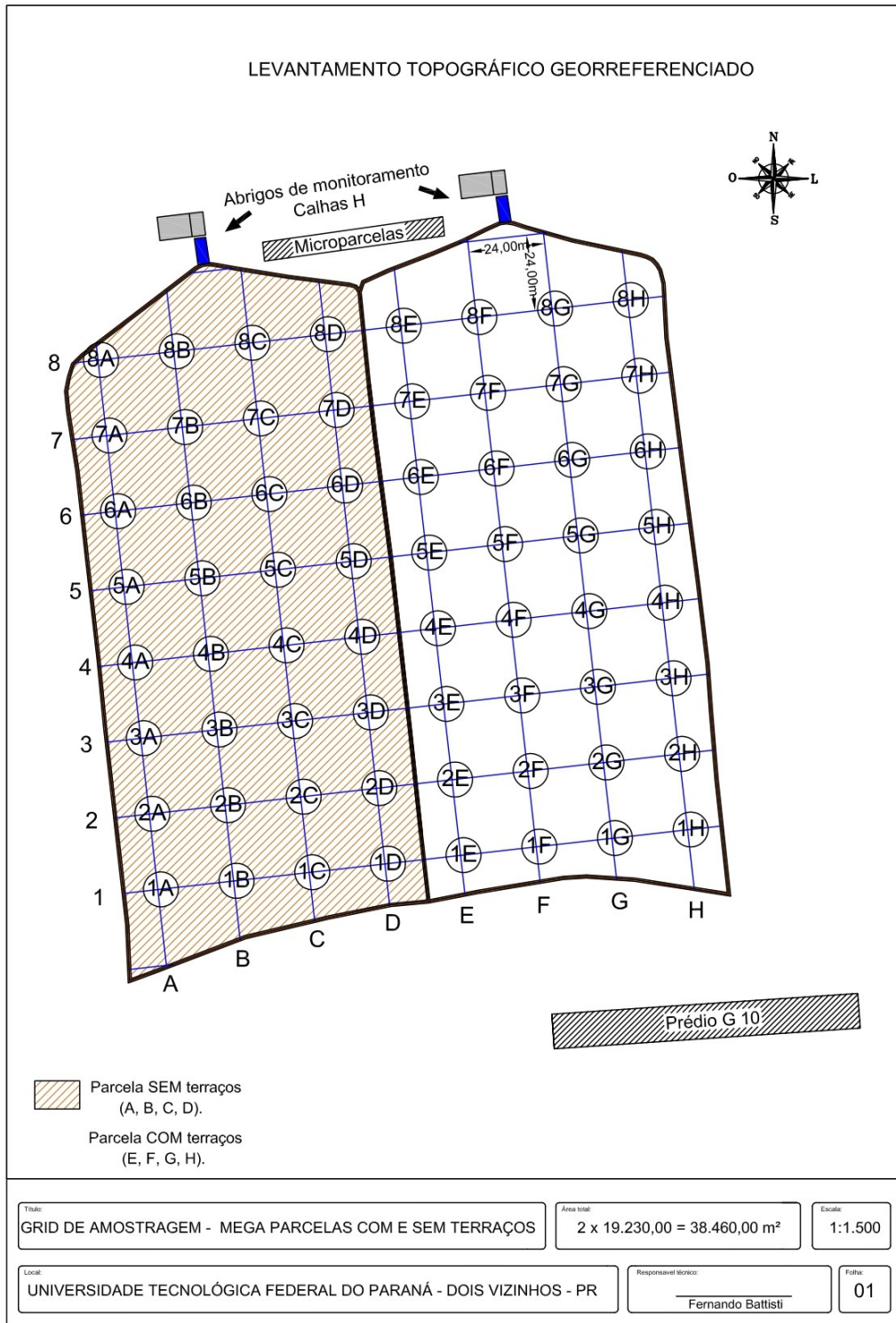
Foi estabelecida uma malha amostral de 64 pontos entre as duas megaparcelas, sendo 24 m equidistantes entre pontos, compondo 8 linhas com 4 pontos de amostragem em cada megaparcela, totalizando 32 pontos amostrais por megaparcela (Figura 1). Todas as variáveis respostas analisadas foram coletadas seguindo essa malha amostral. As coletas de solo seguiram uma ordem de amostragem ao redor do ponto delimitado. Em 2019, foi coletado em 1 m a norte do ponto, em 2020 coletado em 1 m a leste do ponto, sempre seguindo um sentido horário em relação aos pontos cardeais, de forma a evitar a coleta de amostras indeformadas de solo no mesmo ponto específico onde o solo já foi manipulado em coletas anteriores.

3.4 Caracterização físico-hídrica dos solos das megaparcelas

As amostras de solo para avaliação físico-hídrica foram coletadas em 2019 e 2020. Em 2019, para coleta das amostras com estrutura preservada usou-se anéis metálicos com diâmetro de 6,0 cm e altura de 3,0 cm, conferindo 84,7 cm³. Já em 2020, foram utilizados anéis com 5,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, aferindo volume de 98,13 cm³. Independente do ano, os anéis com a estrutura de solo preservada foram acondicionados sobre tecido *voil* e envoltos em plástico filme. As amostras que não precisavam ter a estrutura preservada foram coletadas e acondicionadas em sacos plásticos.

As coletas foram realizadas nos 64 pontos da malha amostral no centro das camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m para as propriedades do solo, exceto para umidade volumétrica, onde coletou-se além das camadas citadas acima, na de 0,40-0,50 m e estabilidade de agregados, que foi coletada uma única amostra da camada 0,00-0,10 m.

Figura 1. Georreferenciamento das megaparcelas com e sem terraços.



Fonte: Battisti (2020)

3.5 Condutividade hidráulica do solo saturado

A avaliação da condutividade hidráulica do solo saturado é uma propriedade físico-hídrica que tem papel de expressar a velocidade em que a água se movimenta em determinado perfil de solo. É a estimativa de água percolada em uma determinada amostra indeformada de solo e saturada contida em um cilindro e submetido a uma carga de água constante, onde é medido a água percolada em um determinado tempo e relacionada a seção transversal da amostra (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Assim, as amostras de solo com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade durante 48 horas, submetidas a carga de água constante durante um período mínimo de duas horas, onde se observou o volume de água percolado coletando-se 3 amostradas com intervalo de 10 min.

Com isso, foi determinada a condutividade hidráulica pela equação de Darcy descrita por Teixeira *et al.* (2017).

$$K_{sat} = \left(\frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \right),$$

onde k_{sat} é condutividade hidráulica (cm h^{-1}), Q é o volume percolado (cm^3), L é a altura do bloco do solo (cm), H é a altura do bloco de solo e da coluna de água (cm), A é a área do cilindro (cm^2) e t é o tempo em horas.

3.6 Porosidade total

A porosidade total do solo é a fração possível de ser ocupada por água ou ar em determinada amostra (TEIXEIRA *et al.*, 2017). O princípio do método é uma medida direta entre a quantidade necessária de água para saturar uma amostra de solo com volume conhecido, assumindo que a densidade da água é 1 Mg m^{-3} . O método direto de avaliação utilizado foi o citado por Teixeira *et al.* (2017). A amostras indeformadas de solo foram submetidas a saturação por 48 horas, pesadas e secas em estufa com temperatura de $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 horas para obtenção do peso seco da amostra.

A equação utilizada para cálculo foi, de acordo com Teixeira *et al.* (2017).

$$P_t = \frac{\{(a-b)-(c-d)\}}{v},$$

onde P_t é a porosidade total ($m^3 m^{-3}$), a é a massa do conjunto amostra, cilindro, tecido e atilho, b é a massa do conjunto cilindro, tecido e a atilho, c é a massa do conjunto amostra, cilindro e lata seco a 105 °C (Mg), d é a massa do conjunto cilindro e lata seco a 105 °C (Mg) e V é o volume total da amostra (m^3), assumindo ser igual ao volume interno do cilindro.

O volume foi calculado pelas dimensões internas do cilindro, conforme equação descrita por Arquimedes.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h,$$

onde: V é o volume do cilindro (m^3), r é o raio interno do cilindro (m) e h é a altura do cilindro (m).

3.7 Microporosidade

A microporosidade pode ser definida como o volume de poros com diâmetro inferior a 50 μm (0,05 mm), equivalente à água contida em uma amostra de solo submetida a uma coluna de água de 0,6 m. Para isso as amostras são saturadas e colocadas em mesa de coluna de areia onde se aplica uma tensão de 6 kPa (0,6 m) até que se tenha equilíbrio de peso (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A metodologia consistiu na saturação das amostras por 48 horas, que foram acondicionadas em mesa de coluna de areia baixando o nível de 0,0 m para 0,6 m, mantido até que houvesse um equilíbrio no peso da amostra (em torno de 72 horas). Para fins de cálculos, a microporosidade foi obtida na diferença entre o peso pós equilíbrio à 6 kPa e o peso após a amostra seca a 105 °C, pela equação descrita por Teixeira *et al.* (2017):

$$M_i = \frac{\{(a-b)-(c-d)\}}{V},$$

onde M_i é a microporosidade ($m^3 m^{-3}$), a é a massa do conjunto cilindro, tecido, atilho, solo e água retida após equilíbrio com potencial de 6 kPa (Mg), b é a massa do conjunto cilindro, tecido e atilho após equilíbrio com potencial de 6 kPa (Mg), c é a massa do conjunto amostra, cilindro e lata seco a 105 °C (Mg), d é a massa do conjunto cilindro e lata seco a 105 °C (Mg) e V é o volume total da amostra (m^3), assumindo ser igual ao volume interno do cilindro.

3.8 Macroporosidade

A macroporosidade são os poros não capilares, correspondente aos espaços porosos maiores de 50 μm (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A estimativa da macroporosidade foi feita pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, de acordo com a equação descrita por Teixeira *et al.* (2017).

$$Ma = (Pt - Mi),$$

onde Ma é a macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), Pt é a porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) calculada de acordo com o item 3.5 e Mi é a microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) calculada de acordo com o item 3.6.

3.9 Densidade do solo

A densidade do solo é a massa que uma determinada amostra de solo tem sobre o volume que ela ocupa e foi obtida a partir de amostras não deformadas em cilindros submetidas a secagem até peso constante em estufa a 105 °C, e posteriormente, determinada pela equação descrita por Teixeira *et al.* (2017).

$$Ds = \frac{(a-b)}{V},$$

onde: Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}), a é a massa do conjunto amostra, cilindro e lata seco a 105 °C (Mg), b é a massa do conjunto cilindro e lata seco a 105 °C e V é o volume total da amostra (m^3), assumindo ser igual ao volume interno do cilindro.

3.10 Densidade de partículas

O método visa determinar a densidade média das partículas minerais e orgânicas de uma determinada amostra ou o volume efetivamente ocupado por partículas sólidas, sem considerar a porosidade (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Assim, para densidade de partícula foram usados dois métodos de avaliação: o método do balão volumétrico (Dp) descrito por Teixeira *et al.* (2017) e o método do balão volumétrico modificado (Dp_m), similar ao descrito por Flint; Flint (2002).

A D_p foi determinada mediante a realização da (i) preparação das amostras de solo com maceração, secagem em estufa a 105 °C por 24 h (terra fina seca em estufa-TFSE) e resfriamento em dessecador; (ii) aferição volumétrica dos balões de 50 cm³ com bureta de 50 cm³, afixando-se uma fita adesiva na posição do menisco quando este não coincidia com a aferição do balão, colocando-se posteriormente os balões para secar; (iii) pesagem da massa do balão volumétrico previamente aferido e seco (M_b); (iv) transferência de, aproximadamente, 20 g de TFSE para o balão volumétrico, tomando-se a massa do balão com solo (M_{bs}); (v) adição de álcool etílico (92 °GL) na bureta, ajustando-se o volume com a capacidade da bureta; (vi) passagem do álcool da bureta até a metade do volume do balão contendo solo, seguido de agitação manual até eliminação do ar existente entre as partículas do solo, completando posteriormente o volume do balão até o traço de aferição, tomando-se a leitura do volume de álcool gasto (V_u).

Posteriormente, a D_p foi calculada de acordo com a equação descrita por Teixeira *et al.* (2017):

$$D_p = \frac{m}{(V_t - V_u)},$$

onde D_p é a densidade de partícula (Mg m⁻³, equivalente a g cm⁻³), m é a massa da amostra de solo seca a 105 °C (g), V_t é o volume total do balão (cm³) e V_u é o volume utilizado para completar o menisco do balão com a amostra de solo (cm³).

Para D_{pm} utilizou-se as mesmas etapas (i), (ii), (iii), (iv), (v) e (vi) da determinação da D_p . Posteriormente, a massa do balão contendo o solo mais o álcool foi aferida (M_{bsa}), e a D_{pm} calculada de acordo com a equação:

$$D_{pm} = \frac{m}{V - \left(\frac{M_{au}}{D_a}\right)},$$

onde D_{pm} é a densidade de partícula (Mg m⁻³, equivalente a g cm⁻³), m é a massa da amostra de solo seca a 105 °C (g), V é o volume total do balão (cm³), M_{au} é a massa de álcool utilizada para completar o menisco do balão com a amostra de solo (g) e D_a é a densidade do álcool (g cm⁻³).

Para determinação da densidade do álcool (D_a) adicionou álcool na bureta até ajustar a sua capacidade e aferiu a massa do álcool contido na bureta. A D_a foi obtida por meio da divisão da massa do álcool pelo seu volume, usando-se como valor final a média de quatro repetições, de acordo com a equação:

$$D_a = \frac{m_a}{V},$$

onde D_a é a densidade do álcool (g cm^{-3}), m_a é a massa do álcool (g) e V é o volume do álcool (cm^{-3})

3.11 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica do solo foi determinada pelo método da pipeta (KLEIN *et al.*, 2013; SUZUKI *et al.*, 2015). A dispersão das amostras de solo foi realizada em um agitador horizontal com 120 rpm durante 4 h, utilizando recipientes de vidro de 100 mL contendo 20 g de solo, 10 mL de NaOH 6% (dispersante químico), 50 mL de água destilada e uma esfera de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de $1,11 \text{ g cm}^{-3}$ (SUZUKI *et al.*, 2004a; SUZUKI *et al.*, 2004b).

3.12 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) foi avaliada no ano de 2019 (29/11/2019 e 20/12/2019) e em 2020 (01/10/2020 e 09/12/2020), nas camadas de 0,00-0,10; 0,10- 0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m. A resistência mecânica do solo à penetração foi avaliada em campo com um penetrômetro eletrônico digital com coletor automático de dados, da marca Falker[®]. Com obtenção de dados a cada 1 cm, até 0,5 m de profundidade, com 5 medições em um raio de 3 m em cada ponto de amostragem, nas duas megaparcelas. A velocidade de penetração constante foi de 1 cm s^{-1} com 1,2 cm de diâmetro de cone e ângulo de 30° .

3.13 Umidade volumétrica

As amostras de solo com estrutura não preservada para umidade volumétrica (θ_v) foram coletadas concomitantemente à medição da resistência mecânica do solo à penetração, pesadas e secas em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingirem peso constante para obtenção da umidade gravimétrica.

A umidade gravimétrica foi multiplicada pela densidade do solo de cada camada correspondente para determinar a umidade volumétrica do solo.

3.14 Estabilidade de agregados do solo

O método visa determinar a quantidade e a distribuição do tamanho de agregados estáveis em água após agitação mecânica (tamisação) (YODER, 1936), onde se pôde mensurar o diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) do solo pelas equações, de acordo com metodologia de Kemper modificada por Castro Filho; Muzilli; Podanoschi (1998),

O procedimento da metodologia foi:

- 1) Coleta: amostras de solo foram coletadas nas condições de capacidade de campo e destorroadas com as mãos cuidadosamente, quebrando os agregados maiores;
- 2) Forma então passadas em peneira de 20 cm de diâmetro com abertura de malha de 19 mm, armazenadas em um recipiente e levadas para análise no laboratório;
- 3) A amostra foi colocada em uma bandeja, o solo espalhado cuidadosamente e a amostra separada em forma de cruz para se obter quatro frações;
- 4) Cada uma das 4 sub-amostras de 80 g foram pesadas (peso do material úmido), mantendo 3 sub-amostras para as peneiras e a 4^o para determinar a massa seca (MS) a 105 °C;
- 5) Preparo do aparelho de Yoder (tamisador): foram montados 3 conjuntos de seis peneiras de 13 cm de abertura, com malhas sobrepostas na seguinte sequência: 0,25, 0,50, 1, 2, 4 e 8 mm. Os conjuntos de peneiras foram dispostos no aparelho de Yoder, adicionou-se água até o nível da malha da peneira de 8 mm e colocou-se um papel filtro com a mesma abertura da peneira de forma a umedecê-lo;
- 6) Em cada jogo de peneiras, a amostra de agregado com 80 g foi distribuída sobre o papel filtro e deixada em repouso para saturação por capilaridade (não submergir o papel filtro) durante 10 minutos;
- 7) Depois de saturado, o papel filtro foi retirado com o auxílio de uma pisseta e agitado por 15 minutos, com movimento vertical de 30 oscilações por minuto;
- 8) Após a agitação, o solo retido em cada peneira foi transferido para frascos identificados com auxílio de jatos de água fracos dirigidos ao fundo da peneira, em seguida, colocado na estufa para secagem a 105 °C e pesado.

3.15 Monitoramento pluviométrico

O monitoramento da chuva na bacia e nas megaparcelas, além do pluviógrafo instalado junto à seção de monitoramento, foi realizado em quatro pluviômetros distribuídos na área, o que permitiu a representação adequada da distribuição espacial das chuvas e a correção dos dados do pluviógrafo.

3.16 Produtividade das culturas nas megaparcelas

A soja da safra 2019/20 foi colhida em 13/02/2020 e na safra 2020/21, em 18/02/2021. O milho safrinha teve as amostras de produtividade coletadas na primeira quinzena de julho de 2021.

A colheita foi manual e feita na malha regular de 32 pontos distribuídos 24 m equidistantes em cada megaparcela, onde coletou-se nas áreas de soja 3 linhas de plantio com 4 metros de comprimento em cada e na área de milho, 2 linhas de 5 metros. Posteriormente, foi feita a trilhagem e peso de cada amostra. A determinação da umidade foi realizada pela média de 3 repetições com um determinador de umidade de grãos e corrigida para 12% de umidade, para prosseguir com as análises estatísticas.

3.17 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes Kolmogorov-Smirnov (d) e Bartlett (χ^2) para avaliar a normalidade e a homoscedasticidade, respectivamente. Os dados que não tiveram distribuição normal ou homogeneidade de variâncias foram submetidos à transformação logarítmica ($\log(y+1)$).

As médias das propriedades físico-hídricas de cada camada e de produtividade da soja nas safras 2019/20 e 2020/21 e do milho safrinha 2021 entre a CT e a ST foram comparadas pelo *Least Significant Difference (LSD) test* (teste t), ao nível de 5% de significância.

Os coeficientes de variação (CV%) da análise estatística foram analisados com base na classificação proposta por Warrick; Nielsen (1980), sendo baixa variabilidade ($CV < 12\%$), média variabilidade ($12 \leq CV \leq 62\%$) e alta variabilidade ($CV > 62\%$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Propriedades físicas do solo

A composição granulométrica do solo não diferiu significativamente entre as megaparcelsas com e sem terraços (ST e CT, respectivamente). Os resultados demonstram, para ambas as áreas, a mesma textura muito argilosa do solo ao longo das camadas de 0,0 – 0,4 m do perfil avaliado (Tabela 1). A textura é considerada como um dos fatores capazes de indicar a qualidade dos solos, uma vez que, influencia na adesão e coesão das partículas, e conseqüentemente, no manejo, interferindo em processos bióticos como a ciclagem de nutrientes e troca de íons (HE *et al.*, 2014). Os solos de textura muito argilosa são mais pesados e possuem altos teores de argila, superiores a 60%, e por isso, possuem baixa infiltração e alta capacidade de retenção de água e nutrientes, além de maior força de coesão entre as partículas, dificultando a penetração de raízes e mesmo sendo mais resistentes à erosão, são facilmente compactados, principalmente sob alta umidade e atividade mecanizada, quando a área é agricultável.

Em relação à densidade de partículas (D_p e D_{p_m}), também não foi observada diferença significativa entre solos da área ST e CT em nenhum resultado, tanto estimada pelo método balão volumétrico (D_p) quanto pelo balão volumétrico modificado (D_{p_m}) (Tabela 1), uma vez que a densidade de partículas é uma característica estática e alterações nesse valor só são perceptíveis após um tempo de desestruturação do solo avaliado (BICALHO, 2011). A adoção manejos adequados podem contribuir para a melhoria das características físicas deste solo, ao longo dos cultivos, principalmente quando há cobertura vegetal, podendo assim, reduzir o processo erosivo e a perda de água, solo e nutrientes pelo escoamento superficial (FAVARATO *et al.*, 2015; OLIVEIRA; LIMA; VERBURG, 2015; SANTOS *et al.*, 2017; COLOMBO *et al.*, 2017).

Tabela 1. Distribuição granulométrica e densidade de partículas das megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT), em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.

Camada (m)	Distribuição Granulométrica			Classe Textural	Densidade de partículas	
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)		Dp (Mg m ⁻³)	Dp _m (Mg m ⁻³)
ST						
0,00-0,10	2,4 ^{ns}	31,2 ^{ns}	66,4 ^{ns}	Muito argiloso	2,87 ^{ns}	2,81 ^{ns}
0,10-0,20	2,0 ^{ns}	29,4 ^{ns}	68,6 ^{ns}	Muito argiloso	2,89 ^{ns}	2,84 ^{ns}
0,20-0,30	2,0 ^{ns}	29,6 ^{ns}	68,3 ^{ns}	Muito argiloso	2,90 ^{ns}	2,85 ^{ns}
0,30-0,40	1,6 ^{ns}	27,5 ^{ns}	70,9 ^{ns}	Muito argiloso	2,90 ^{ns}	2,85 ^{ns}
CT						
0,00-0,10	2,2	30,4	67,5	Muito argiloso	2,87	2,82
0,10-0,20	1,8	27,5	70,7	Muito argiloso	2,87	2,82
0,20-0,30	1,8	27,3	70,8	Muito argiloso	2,90	2,85
0,30-0,40	1,5	24,4	74,1	Muito argiloso	2,91	2,87

^{ns} Médias não significativas; ST: sem terraços; CT: com terraços; Dp: densidade de partículas pelo método do balão volumétrico; Dp_m: densidade de partículas pelo método do balão volumétrico modificado.

A densidade do solo (Ds) teve baixa variabilidade (CV < 12%) em todas as camadas avaliadas, tanto em 2019 quanto em 2020, provavelmente devido à recente retirada dos terraços, não tendo influência significativa nessa propriedade até o momento (Tabela 2). Como é relatado, cada tipo de solo possui uma Ds crítica, onde a resistência aumenta significativamente, podendo dificultar ou impedir o crescimento das raízes (ROSEMBERG, 1964; CINTRA; MIELNICZUK, 1983; PEDÓ, 1986) e esse valor depende principalmente de sua classe textural. Argenton *et al.* (2005) já observaram que em Latossolo Vermelho argiloso há menor aeração com Ds próxima de 1,30 Mg m⁻³ e Klein (2006) relatou que a Ds limitante em seus estudos foi de 1,33 Mg m⁻³, para mesma classe de solo, semelhante ao trabalho anterior. REICHERT; REINERT; BRAIDA (2003) constataram Ds crítica para algumas classes texturais que variaram de 1,30 a 1,40 Mg m⁻³ em solos argilosos e 1,40 a 1,50 Mg m⁻³ em franco-argilosos. No caso deste trabalho, a classe textural dos solos foi definida como muito argilosa e as Ds encontradas em todas as camadas avaliadas e em ambos os anos, estão abaixo da faixa crítica média de 1,30 Mg m⁻³, podendo não afetar negativamente a porosidade total do solo e conseqüentemente, aumentar a resistência e interferir no desenvolvimento das raízes das culturas.

No entanto, a interação entre o solo e as atividades agrícolas é evidenciada por serem solos agricultáveis por muitos anos consecutivos, onde um possível aumento da Ds ao longo do tempo pode prejudicar as atividades mecanizadas, devido à menor aeração pela quebra dos

macroporos, além de dificultar a infiltração de água, aumentar o escoamento superficial e ainda diminuir o crescimento do sistema radicular ao longo do perfil do solo (CARDOSO *et al.*, 2003; FOLONI; COLONEGO; LIMA, 2003; MIRANDA; COGO; VILELA, 2017). Esse aumento da Ds pode iniciar um processo de degradação, prejudicando a estrutura física do solo, visto que, há rompimento dos agregados e junção das partículas, favorecendo uma possível compactação, devido ao aumento na Ds (LEPSCH *et al.*, 2015). Por isso, um manejo adequado, uso do plantio direto e a prática de terraceamento podem promover a produção de água em quantidade e em qualidade, uma vez que, o terraço aumenta o volume de água infiltrada e o sistema de plantio direto preserva a camada mais superficial do solo evitando a perda de sedimentos.

Em relação à porosidade total (Pt), o CV também teve baixa variabilidade (< 12%), não havendo diferenças entre as áreas CT e ST. Segundo Vieira (1975), solos com partículas mais finas possuem densidade menor, fazendo com que a porosidade em solos argilosos seja maior variando em torno de 40% a 60% e segundo Ranzani (1969), Pt do solo quase nunca é inferior à 30 e superior a 60%, corroborando com os resultados, onde a Pt média variou entre 55 e 58% em 2019 e de 57 a 60% em 2020, característica de um solo argiloso (Tabela 2).

Essa porosidade total é composta pela macro e microporosidade, responsáveis pela movimentação de água e ar no interior do solo, como infiltração e drenagem e, também, pela retenção da água no solo, respectivamente. Os resultados indicaram que o CV para a variável macroporos (Mac) teve média variabilidade, ficando entre 8 e 13% em 2019 e 11 a 13% em 2020. Já a porcentagem de microporos (Mic) teve baixa variabilidade, ficando em torno de 44 a 48% nos dois anos (Tabela 2). Como a drenagem de um solo não depende diretamente da porosidade, mas sim, do volume de macroporos, solos argilosos, como o deste trabalho, possuem maior volume de porosidade, porém com predominância de microporos, como visto na Tabela 2, aumentando a retenção da água, não tendo, no geral, uma boa drenagem e aeração, mas alta umidade (Tabela 3). Assim, a avaliação das propriedades Mac e Mic têm auxiliado na tomada de decisão sobre o manejo ideal de cada tipo de solo em cada local (THURLER, 1989).

Silva; Fernandes (2014) e Gonçalves *et al.* (2014) relataram que nos solos agricultáveis a porosidade total e a macroporosidade diminuiriam. Assim, o uso de terraços pode modificar as propriedades físico-hídricas do solo e influenciar diretamente na retenção e disponibilidade de água (SILVA; RIOS, 2018; MESFIN *et al.*, 2018), uma vez que os solos em estudo são há

tempo agricultáveis e, conseqüentemente, a desestruturação aumenta constantemente, e se não forem bem manejados, podem reduzir o potencial produtivo das culturas neles cultivadas.

A Figura 2 mostra que em 2019 a Ds e a Pt não diferiram entre a CT e a ST em todas as camadas. A Mic foi significativamente maior na CT, exceto na camada de 0,10-0,20 m, onde diferenças significativas não foram observadas, enquanto a Mac foi estatisticamente menor na área CT apenas na camada de 0,30-0,40 m. A Pt e Mac foram, de maneira geral, inversas à Ds, provavelmente porque solos argilosos possuem alta porosidade, mas predominando a quantidade de microporos, o que favorece a retenção da água e assim, a maior umidade.

Em 2020, a Ds, a Pt, a Mac e a Mic não diferiram entre a CT e a ST em todas as camadas (Figura 2). A Mac foi menor do que o valor adequado para o desenvolvimento das plantas ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) nas camadas mais profundas do solo. Essas menores Mac foram coincidentes às maiores Mic ($r = -0,81$), o que pode ter dificultado o crescimento radicular das plantas, pela alta concentração de poros que favorecem a retenção de água e conseqüentemente, a compactação do solo, provavelmente devido a textura muito argilosa. Por isso, para melhorar a estruturação do solo, medidas adequadas de manejo devem ser tomadas constantemente, mesmo com a presença de terraceamento, que melhora as condições do solo ao longo dos anos.

Tabela 2. Indicadores estatísticos descritivos das propriedades físico-hídricas do solo das megaparcelsas sem terraços (ST) e com terraços (CT), em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.

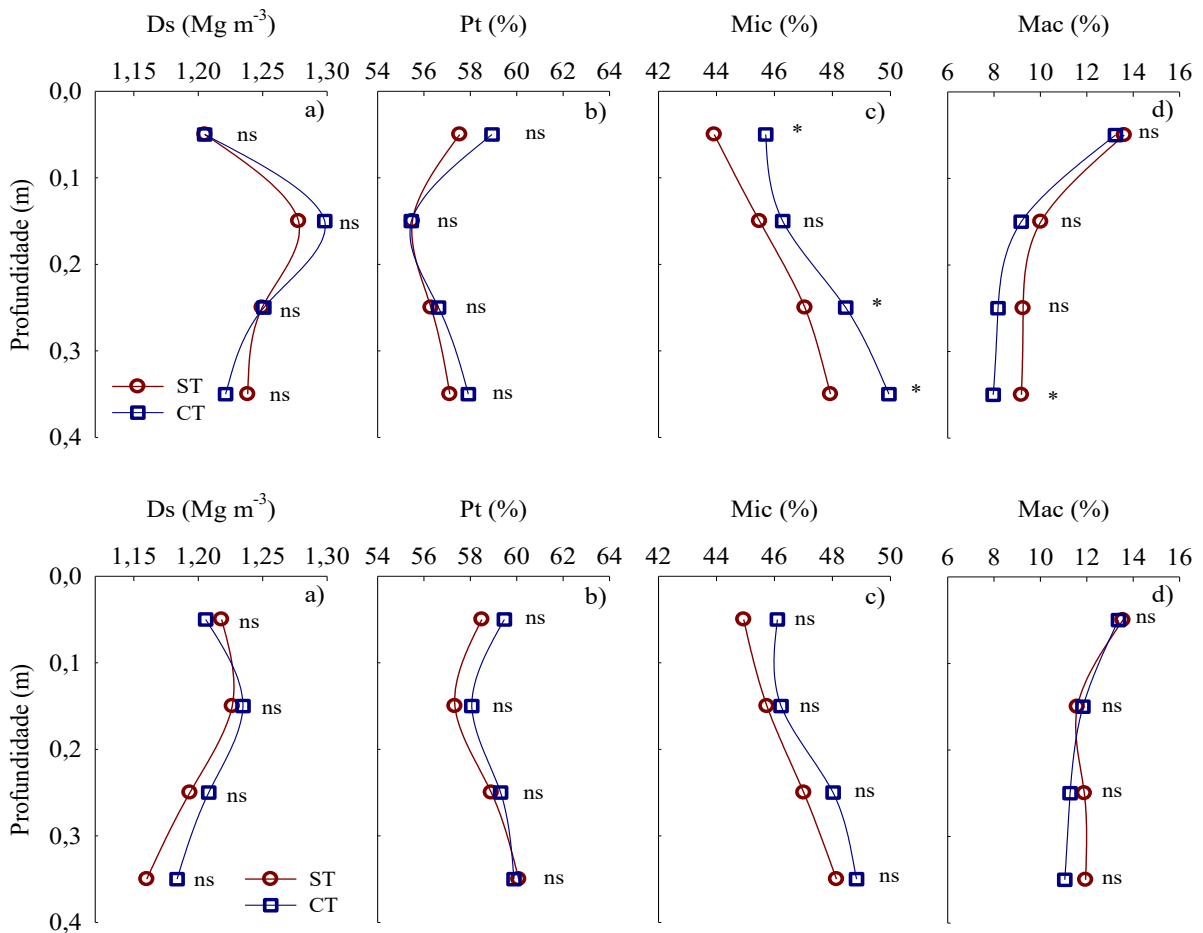
Camada (m)	N	Mín	Máx	Méd	S	s ²	As	K	(continua)
									CV (%)
2019									
Ds (Mg m⁻³)									
0,00-0,10	64	0,96	1,41	1,21	0,11	0,01	-0,29	-0,75	9
0,10-0,20	64	0,97	1,46	1,29	0,09	0,01	-0,56	2,15	7
0,20-0,30	64	1,06	1,42	1,25	0,07	0,01	-0,14	0,20	6
0,30-0,40	64	1,04	1,41	1,23	0,08	0,01	0,12	-0,03	6
Pt (%)									
0,00-0,10	64	51,1	67,0	58,2	3,6	13,1	0,21	-0,40	6
0,10-0,20	64	51,3	61,1	55,5	2,0	4,1	0,02	-0,14	4
0,20-0,30	64	51,2	64,4	56,5	2,3	5,5	0,61	1,41	4
0,30-0,40	64	53,3	63,0	57,5	2,1	4,5	0,28	-0,08	4

Tabela 2. Indicadores estatísticos descritivos das propriedades físico-hídricas do solo das megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT), em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.

(conclusão)									
Mac (%)									
0,00-0,10	64	6,3	24,0	13,4	4,3	18,4	0,45	-0,48	32
0,10-0,20	64	4,8	18,8	9,6	2,7	7,1	0,75	0,87	28
0,20-0,30	64	4,4	15,4	8,7	2,5	6,4	0,62	0,05	29
0,30-0,40	64	4,6	14,4	8,6	2,3	5,1	0,45	-0,27	26
Mic (%)									
0,00-0,10	64	37,3	52,4	44,8	2,9	8,5	-0,35	0,56	7
0,10-0,20	64	40,3	51,0	45,9	2,4	5,7	-0,02	-0,11	5
0,20-0,30	64	42,9	57,4	47,8	2,7	7,1	0,65	1,44	6
0,30-0,40	64	42,1	54,7	48,9	2,8	7,9	-0,23	-0,42	6
2020									
Ds (Mg m⁻³)									
0,00-0,10	64	0,96	1,42	1,21	0,11	0,01	-0,25	-0,49	9
0,10-0,20	64	1,06	1,43	1,23	0,08	0,01	0,31	0,27	6
0,20-0,30	64	1,07	1,45	1,20	0,07	0,01	0,62	1,13	6
0,30-0,40	64	1,02	1,37	1,17	0,07	0,00	0,60	0,94	6
Pt (%)									
0,00-0,10	64	49,6	68,5	59,0	4,2	18,0	0,20	-0,33	7
0,10-0,20	64	51,6	65,4	57,7	2,4	5,8	0,52	1,35	4
0,20-0,30	64	53,4	64,0	59,1	2,4	5,7	0,08	-0,07	4
0,30-0,40	64	55,7	63,9	60,0	2,1	4,3	-0,01	-0,82	3
Mac (%)									
0,00-0,10	64	2,4	25,0	13,5	4,2	17,6	0,43	0,52	31
0,10-0,20	64	6,9	17,9	11,7	2,7	7,4	0,48	-0,53	23
0,20-0,30	64	4,5	20,7	11,6	3,2	10,3	0,37	0,62	28
0,30-0,40	64	5,4	17,7	11,5	2,9	8,4	0,08	-0,71	25
Mic (%)									
0,00-0,10	64	38,3	51,9	45,5	2,4	5,9	0,14	0,56	5
0,10-0,20	64	41,4	50,1	46,0	2,0	3,9	-0,28	-0,51	4
0,20-0,30	64	42,2	52,2	47,5	2,4	6,0	-0,23	-0,68	5
0,30-0,40	64	44,1	53,4	48,5	2,0	4,0	0,16	-0,35	4

Densidade do solo (Ds); porosidade total (Pt); macroporosidade (Ma); microporosidade (Mi); número de observações (N); mínimo (mín); máximo (máx); média (méd); desvio padrão (s); variância (s²); assimetria de Pearson (As); curtose (K); coeficiente de variação de Pearson (CV).

Figura 2. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mic) e macroporosidade (Mac) das megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT) em 2019, em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.



Fonte: Grupo de Pesquisa em Ciência do solo, UTFPR campus Dois Vizinhos.

Além da porosidade do solo, a resistência do solo à penetração (RP) está diretamente correlacionada com a resistência física do solo ao desenvolvimento radicular, e depende de vários fatores como textura, densidade, matéria orgânica e, principalmente, a umidade volumétrica (θ_v) ($r = 0,94$) (STOLF; FERNANDES; URLANI, 1983; BUSCHER *et al.*, 1997), que teve baixa variabilidade em 2019 e 2020, aumentando de acordo com as camadas mais profundas avaliadas (Tabela 3).

Assim, os resultados na Tabela 3 mostram que a RP variou de 0,79 a 2,08 em 2019 e de 1,06 a 2,01 em 2020. Em 29/11/2019 e 20/12/2019, os valores de RP variaram ao longo das camadas avaliadas, chegando a 2,30 e 2,01 MPa, respectivamente, na camada 0,10-0,20 m, sendo que o valor crítico é de 2,0 MPa até 0,10 m de profundidade, indicando uma alta

resistência (BENGOUGH; MULLINS, 1990). Nas demais camadas, pode-se observar que conforme a θ_v aumentou, a RP diminuiu, provavelmente pelo secamento das camadas mais superficiais. Em 2020, na mesma camada (0,10-0,20 m) os valores de RP também foram maiores (2,01 e 2,75 MPa, respectivamente) do que nas demais. Além disso, a θ_v foi aumentando conforme a profundidade e a RP, diminuindo (Tabela 3).

De acordo com a Figura 3, a RP não diferiu significativamente entre a ST e a CT, em 2019, enquanto a θ_v foi significativamente maior na CT nas camadas 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m. A RP foi maior do que 2,0 MPa na CT e na ST, na primeira avaliação de 2019, exceto na camada superficial (0,00-0,10 m). Na segunda avaliação, a RP foi maior do que 2,0 MPa na CT e na ST apenas na camada de 0,10-0,20 m. Em 2020, na primeira avaliação, a RP diferiu significativamente entre ST e CT apenas na camada de 0,20-0,30 m, enquanto a θ_v não mostrou diferenças estatísticas. Já na segunda avaliação, a RP também diferiu entre ST e CT apenas na camada de 0,20-0,30 m, enquanto a θ_v foi estatisticamente diferente em todas as camadas avaliadas (Figura 3). Assim, como discutido acima, a RP aumentou ao longo das camadas avaliadas e teve uma forte correlação positiva com a θ_v ($r = 0,94$) dificultando o desenvolvimento radicular das culturas, em ambos os anos avaliados, independentemente da presença ou não dos terraços, provavelmente porque a área sem terraceamento ainda é recente para indicar resultados significativos.

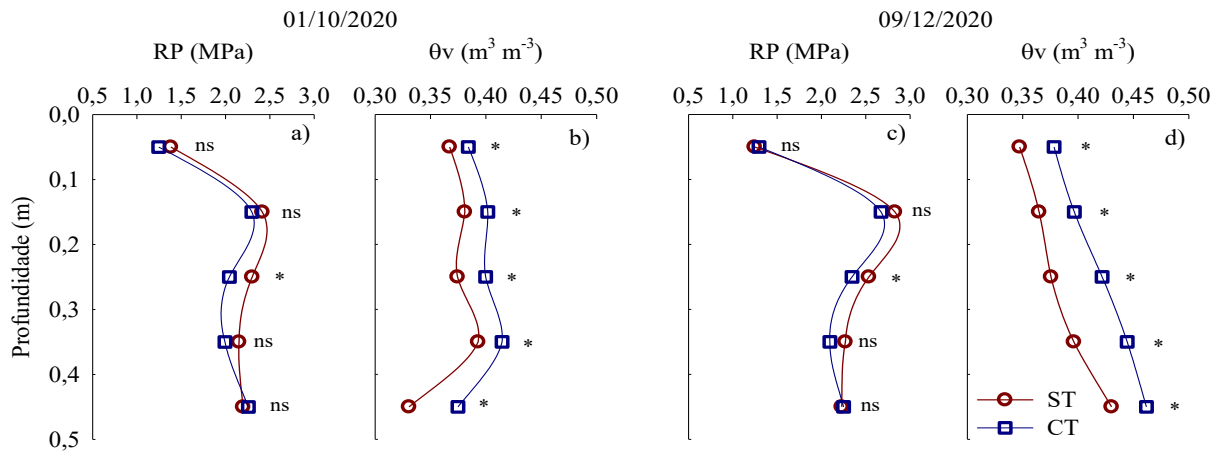
Como os implementos agrícolas podem, pela pressão que exercem sobre o solo, modificar sua estrutura física, e quando as condições de θ_v não estão adequadas, resulta no aumento da compactação e diminuição da produtividade das culturas (CORTEZ *et al.*, 2017; FERRARI *et al.*, 2018), visto que a compactação do solo pode aumentar a D_s , devido aos altos valores de RP (VALADÃO *et al.*, 2015; SCAPINELLI *et al.*, 2016), reduzindo a infiltração pelo aumento dos microporos no perfil do solo, como visto nos resultados apresentados. Como a RP é uma propriedade adequada para indicar o grau de compactação existente no solo, pode-se dizer que os solos, tanto nas áreas CT quanto nas áreas ST, podem ter alta compactação ao longo das camadas, dificultando o desenvolvimento das culturas e afetando diretamente a produtividade final.

Tabela 3. Indicadores estatísticos descritivos das propriedades físico-hídricas do solo das megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT), em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.

(continua)									
Camada (m)	N	Mín	Máx	Méd	S	s ²	As	K	CV (%)
2019									
RP (MPa) – 29/11/2019									
0,00-0,10	64	0,31	1,93	0,79	0,29	0,08	1,12	2,61	36
0,10-0,20	64	1,20	3,41	2,30	0,35	0,12	-0,19	2,17	15
0,20-0,30	64	1,52	2,95	2,27	0,29	0,08	0,02	0,07	13
0,30-0,40	64	1,43	2,95	2,15	0,30	0,09	0,40	0,17	14
0,40-0,50	64	1,52	2,84	2,08	0,31	0,09	0,34	-0,53	15
θ_v (m³ m⁻³) – 29/11/2019									
0,00-0,10	64	0,30	0,47	0,38	0,03	0,00	-0,34	0,53	9
0,10-0,20	64	0,35	0,45	0,40	0,02	0,00	-0,01	-0,26	6
0,20-0,30	64	0,33	0,50	0,40	0,03	0,00	0,51	1,07	7
0,30-0,40	64	0,34	0,49	0,41	0,03	0,00	-0,12	-0,23	8
0,40-0,50	64	0,33	0,50	0,43	0,04	0,00	-0,60	0,35	9
RP (MPa) – 20/12/2019									
0,00-0,10	64	0,64	1,65	1,06	0,23	0,05	0,45	-0,39	22
0,10-0,20	64	1,44	2,72	2,01	0,27	0,07	-0,10	-0,04	13
0,20-0,30	64	1,35	2,93	1,88	0,37	0,13	1,17	1,08	19
0,30-0,40	64	1,17	2,60	1,67	0,31	0,09	0,95	0,69	18
0,40-0,50	64	1,07	2,54	1,57	0,28	0,08	0,91	1,23	18
θ_v (m³ m⁻³) – 20/12/2019									
0,00-0,10	64	0,33	0,50	0,40	0,03	0,00	-0,06	0,47	8
0,10-0,20	64	0,36	0,47	0,41	0,02	0,00	0,26	-0,04	5
0,20-0,30	64	0,35	0,54	0,42	0,03	0,00	1,09	3,96	7
0,30-0,40	64	0,33	0,57	0,43	0,04	0,00	0,50	1,72	9
0,40-0,50	64	0,37	0,55	0,46	0,03	0,00	-0,29	0,91	7
2020									
RP (MPa) – 01/10/2020									
0,00-0,10	64	0,53	2,44	1,31	0,37	0,14	0,56	0,49	28
0,10-0,20	64	1,70	3,62	2,36	0,31	0,10	0,81	3,06	13
0,20-0,30	64	1,37	3,52	2,17	0,42	0,17	1,15	2,23	19
0,30-0,40	64	1,44	3,32	2,07	0,42	0,17	1,14	1,45	20
0,40-0,50	64	1,52	3,57	2,23	0,43	0,19	0,75	0,23	19

Figura 3. Resistência do solo à penetração (RP) e umidade volumétrica (θ_v) nas megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT) em 2019 e 2020, em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.

(conclusão)



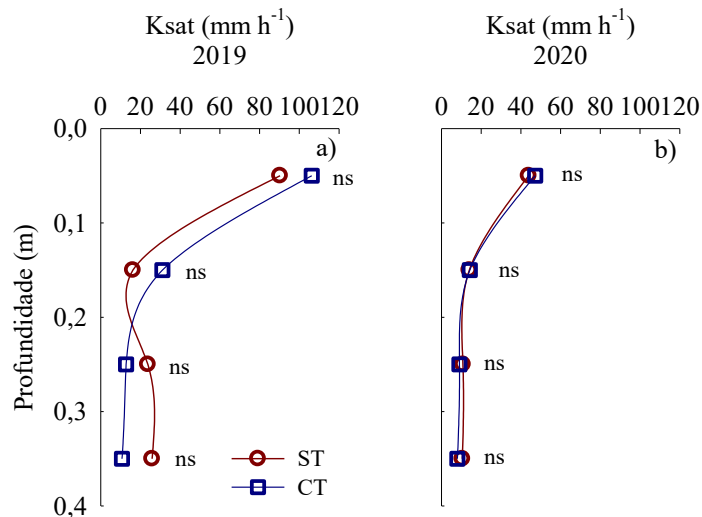
Fonte: Grupo de Pesquisa em Ciência do solo, UTFPR campus Dois Vizinhos.

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) não diferiu significativamente entre a ST e a CT, tanto em 2019 quanto em 2020 (Figura 4). A K_{sat} foi maior na camada superficial do solo de 0,10-0,20 m em comparação com a K_{sat} das camadas mais profundas. Essa propriedade indica a facilidade ou não com que a água consegue se movimentar ao longo do perfil, indicando possível infiltração ou escoamento de água (MORAES, 2003). A K_{sat} é influenciada positiva ou negativamente pela estrutura, textura, D_s ($r = -0,16$), D_p ($r = -0,98$), P_t ($r = 0,27$), Mac ($r = 0,99$) e Mic ($r = -0,82$) do solo. Segundo Silva; Kato (1997), a Mac , principalmente, afeta diretamente a K_{sat} e sua redução provoca diminuição nos valores de K_{sat} . Além disso, os autores relataram que a macroporosidade de áreas sob diferentes manejos afetou os valores de K_{sat} , onde, no manejo convencional foi de $0,0035 \text{ cm s}^{-1}$ no plantio direto foi de $0,0231 \text{ cm s}^{-1}$, evidenciando uma influência direta na estruturação do solo.

No entanto, não corrobora com os resultados deste trabalho, uma vez que nas camadas mais superficiais dos solos a macroporosidade era maior, assim como a K_{sat} , mesmo sendo utilizado plantio direto como sistema de manejo nestes solos e isso pode ter sido influenciado pelas outras propriedades que foram avaliadas neste estudo. Bouma (1982) relata que microporos podem aumentar a K_{sat} , se forem contínuos ao longo do perfil do solo, enquanto os macroporos dificultar a K_{sat} , quando possuem descontinuidade no perfil do solo, o que foi observado nos resultados, uma vez que a maior Mac estava apenas na camada superior e de Mic

predominantemente nas demais camadas inferiores. Por isso, a classificação por tamanho de poros não necessariamente reflete o importante padrão de continuidade dos poros ao longo do perfil do solo (PAULETTO *et al.*, 1988).

Figura 4. Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) nas megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT) em 2019 e em 2020, em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.



Fonte: Grupo de Pesquisa em Ciência do solo, UTFPR campus Dois Vizinhos.

Em relação às propriedades de agregação, o diâmetro médio geométrico (DMG) constitui uma estimativa do diâmetro de agregados predominante, enquanto o diâmetro médio ponderado (DMP) indica a porcentagem de agregados com diâmetro superior a 0,25 mm (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998) e são utilizados na avaliação do nível de agregação e estabilidade da estrutura do solo (CASTRO FILHO *et al.*, 1998; WENDLING *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2014). Assim, o DMG foi estatisticamente inferior na área ST comparado à CT, enquanto o DMP não diferiu entre as áreas ST e CT (Tabela 4), mas foram altos, provavelmente por haver uma quantidade alta de macroporos, principalmente nas camadas mais superficiais dos solos estudados.

Segundo Batista *et al.* (2013) e Silva *et al.* (2014), quanto maior a fração argila, maior será a agregação do solo e como os solos avaliados neste trabalho foram classificados como muito argilosos, essa seria uma possível explicação para a agregação das partículas ao longo do perfil, aumentando a microporosidade nas camadas mais inferiores e a macroporosidade apenas na camada superior. Além disso, considerando a relação direta entre umidade do solo e

suscetibilidade à compactação (LIMA *et al.*, 2012), é possível que os solos, em 2020, estavam mais compactados, visto que, a RP foi mais alta, o que pode ser também justificado pela maior precipitação mensal, indicada na Figura 5, que favoreceu a maior retenção de água ao longo do perfil do solo, por ter maior porosidade e conseqüentemente, maior agregação das partículas.

Os DMP obtidos são semelhantes aos de Melo; Melo; Melo (2017), que encontraram valores próximos a 5 mm na camada de 0,00-0,50 cm. Em contrapartida, os valores de DMG foram superiores aos encontrados neste estudo, ultrapassando 4 mm. Os valores de DMG, no entanto, corroboram com outros trabalhos (WENDLING *et al.*, 2005; SANTOS *et al.*, 2012; BATISTA *et al.*, 2015), como por exemplo, o de Wendling *et al.* (2005), onde os autores encontraram valores de 1,44 mm para DMG na camada 0-5 cm. Assim, esses resultados são favorecidos pela textura muito argilosa (SANTOS *et al.*, 2011), além do efeito cimentante dos óxidos de ferro e alumínio presentes em solos mineralizados (FERREIRA; CAMARGO; VIDOR, 1999) como os do presente estudo.

Tabela 4. Diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DGP) do solo nas megaparcelsas sem terraço (ST) e com terraço (CT), em 2020, em Dois Vizinhos, Paraná-PR, Sul.

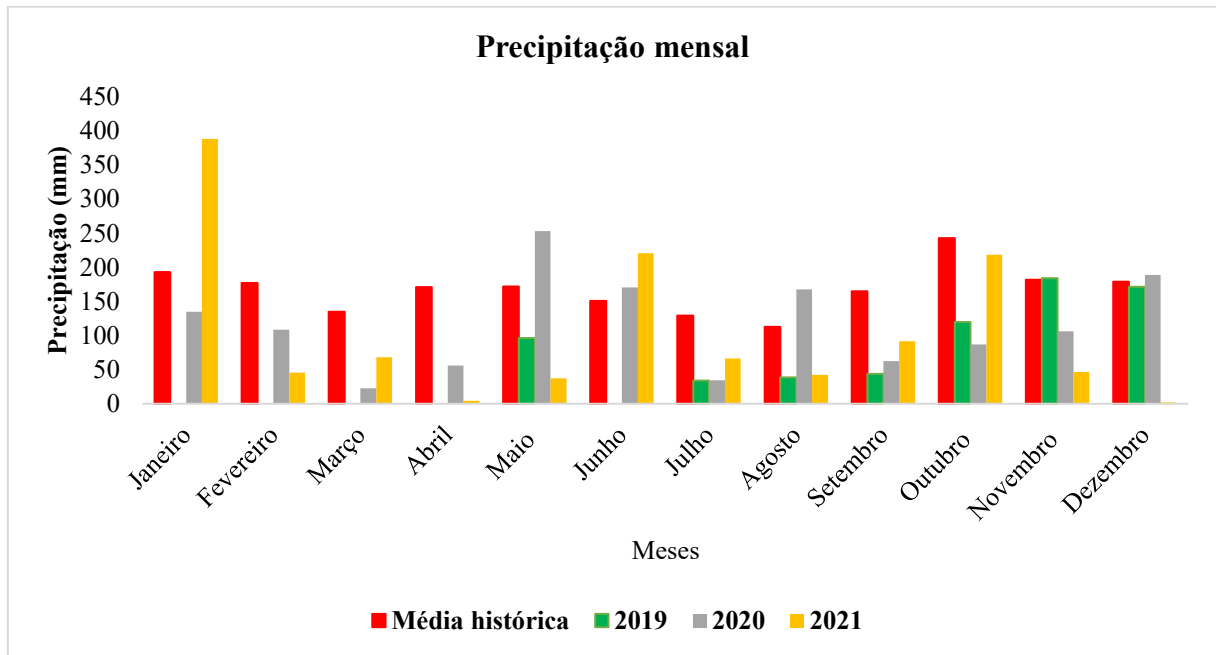
Área	DMG	DMP
ST	1,96*	4,62 ^{ns}
CT	2,18	4,87

Onde: *: significativo a 5 % de probabilidade; ns=não significativo a 5% de probabilidade; ST=Sem Terraço; CT=Com Terraço.

4.2 Comportamento pluvial

Em relação à precipitação mensal (mm) durante os anos avaliados, houve um padrão de precipitação mensal constante ao longo do ano. No entanto, a partir de 2019, as chuvas mostraram-se mais abundantes durante os meses do verão. A soja semeada em 2019 teve uma boa média de chuvas ao longo dos primeiros meses, necessário para uma germinação adequada, mas a partir de janeiro a chuva cessou até maio. Já em 2020, as chuvas foram mais constantes de outubro, durante o plantio, até a colheita em fevereiro. Para o milho safrinha, semeado em fevereiro de 2021, a precipitação foi baixa até maio, voltando a aumentar em junho, um pouco antes da colheita.

Figura 5. Precipitação mensal (mm) da média histórica (INMET, 2023) de Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil e durante os anos de 2019, 2020, 2021 e 2022 coletados pelo Grupo de Pesquisa em Ciência do solo, UTFPR campus Dois Vizinhos.



Fonte: Grupo de Pesquisa em Ciência do solo, UTFPR campus Dois Vizinhos.

A produtividade da soja teve baixa variabilidade ($CV < 12\%$) na safra 2019/20, enquanto a produtividade da soja na safra 2020/21 e a produtividade do milho na safrinha 2021 tiveram média variabilidade ($12 \leq CV \leq 62\%$) (Tabela 5).

Tabela 5. Indicadores estatísticos descritivos da produtividade das culturas nas megaparcelas sem terraços (ST) e com terraços (CT), em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.

Produtividade	N	Mín	Máx	Méd	s	s ²	As	K	CV (%)
Soja (19/20) (Mg ha ⁻¹)	64	3,15	5,29	4,37	0,47	0,22	-0,25	-0,02	10,76
Soja (20/21) (Mg ha ⁻¹)	64	2,71	7,11	4,66	1,14	1,29	0,08	-0,91	24,41
Milho (21) (Mg ha ⁻¹)	64	1,17	5,87	4,17	1,03	1,05	-0,55	-0,17	24,60

Onde: número de observações (N); mínimo (mín); máximo (máx); média (méd); desvio padrão (s); variância (s²); assimetria de Pearson (As); curtose (K); coeficiente de variação de Pearson (CV).

A produtividade da soja não diferiu significativamente entre a CT e a ST no ano agrícola 2019/20, provavelmente porque a precipitação média mensal foi baixa ao longo da safra, 300-400 mm de novembro de 2019 a março 2020, ficando abaixo da média histórica, o que teve

forte influência negativa na safra (CARDOSO *et al.*, 2020). Na safra 2020/21, a soja foi significativamente maior na CT (5,38 Mg ha⁻¹) do que na ST (3,93 Mg ha⁻¹), uma vez que as chuvas foram bem distribuídas ao longo dos meses em que a cultura estava no campo e os terraços foram essenciais para ajudar no escoamento da água, favorecendo o desenvolvimento adequado das plantas. A produtividade da soja ficou acima da média das últimas três safras no município de Dois Vizinhos, que foi de 2,75 Mg ha⁻¹. A produtividade do milho não diferiu significativamente entre a CT e a ST, em 2021, uma vez que, a precipitação durante a safrinha foi baixa (Figura 4), o que justifica ter sido menor do que a média das últimas três safrinhas de milho no município (6,36 Mg ha⁻¹).

Outro fator que pode explicar a variação na produtividade são os efeitos climáticos provocados pelos fenômenos El Niño e La Niña. No Brasil, tanto um quanto outro têm provocado alterações climáticas significativas em todas as regiões. Segundo CPTEC (2011), a região Sul do Brasil tem chuvas intensas e altas temperaturas pela ocorrência do El Niño, enquanto secas severas são causadas pela manifestação do La Niña.

Assim, por ser um solo muito argiloso, com alta densidade de partículas, há um aumento na retenção de água, favorecendo a compactação. Devido à textura das áreas, observou-se uma maior resistência na penetração das raízes, principalmente por haver alta quantidade de macroporos nas camadas superficiais e microporos nas camadas mais profundas. Com isso, ainda não foi possível perceber diferenças significativas entre as áreas com e sem terraceamento, uma vez que a retirada dos terraços é recente, não tendo afetado ainda significativamente as propriedades físicas do solo.

De maneira geral, a produtividade da soja nas duas safras foi satisfatória, ficando dentro da média regional e brasileira que é de 3 a 4 Mg ha⁻¹. O milho safrinha ficou um pouco abaixo da média esperada, entre 5 a 6 Mg ha⁻¹, no entanto, mesmo que numericamente a produtividade tenha sido menor, não se pode afirmar que seja só pelo fato de haver ou não terraços, uma vez que as culturas são diretamente dependentes das condições locais para expressar seu potencial produtivo máximo, além disso, pode ter havido forte influência das baixas precipitações, responsável pelo bom desenvolvimento da cultura (Figura 6).

Figura 6. Produtividade da soja nos anos agrícolas 2019/20 e 2020/21 e do milho safrinha em 2021 nas megaparcelsas sem terraços (ST) e com terraços (CT) em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.

(continua)

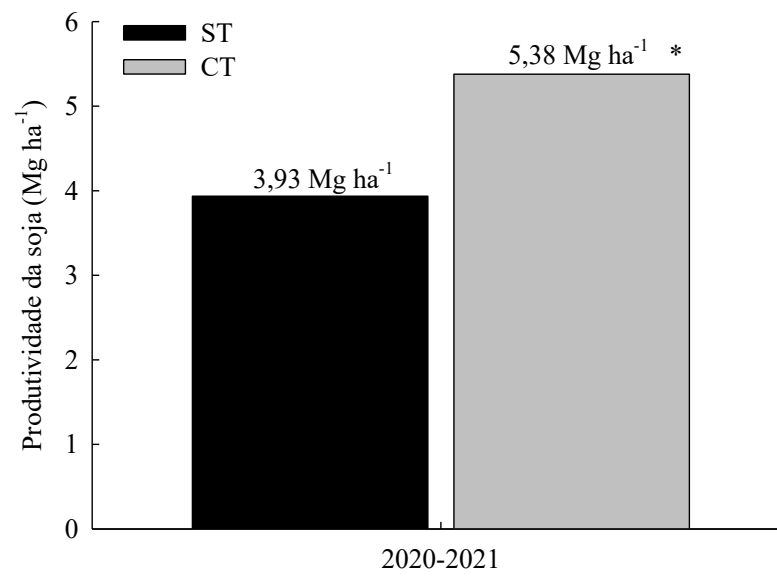
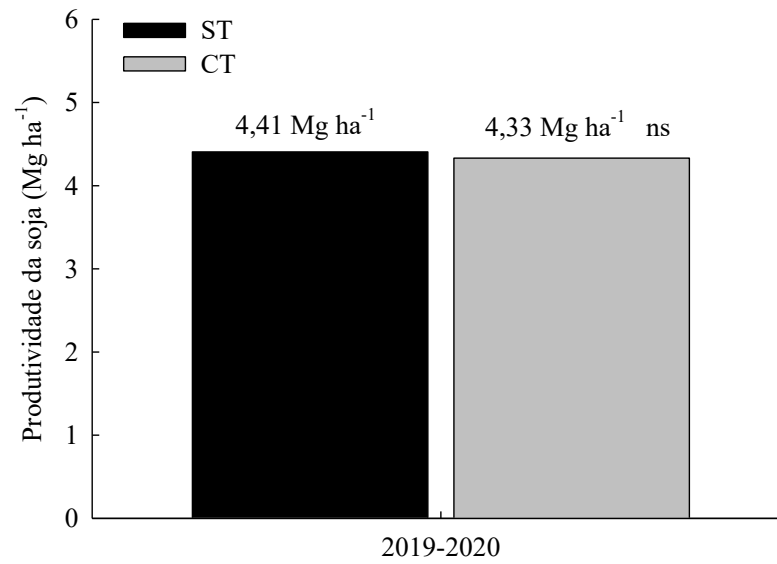
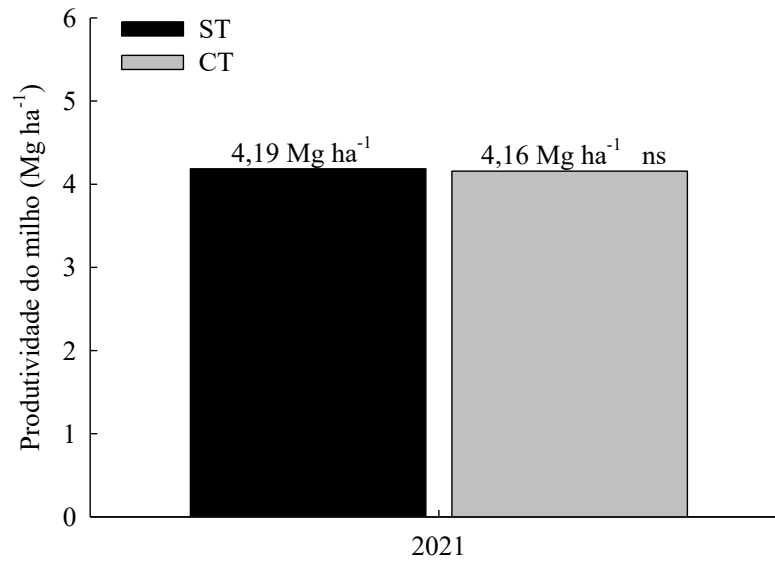


Figura 6. Produtividade da soja nos anos agrícolas 2019/20 e 2020/21 e do milho safrinha em 2021 nas megaparcelsas sem terraços (ST) e com terraços (CT) em Dois Vizinhos, Paraná, Sul do Brasil.

(conclusão)



Fonte: Grupo de Pesquisa em Ciência do solo, UTFPR campus Dois Vizinhos.

5. CONCLUSÃO

O monitoramento do comportamento físico-hídrico do solo e o reflexo na produtividade dos cultivos possibilitou uma caracterização geral, mas ainda não é possível estabelecer uma tendência de comportamento. Como os terraços foram retirados recentemente, ainda não se pode afirmar que haja influência dessa prática nas propriedades físicas do solo, bem como na produtividade das culturas. Assim, é preciso que haja uma continuidade nos estudos para que, futuramente, possa caracterizar os efeitos que a falta do terraceamento pode causar na área produtiva.

REFERÊNCIAS

- ABREU, D. C.; *et al.* Economic and environmental implications of wheat-crop sequences on organic dairy-farm simulations. **Crop and Pasture Science**, Sinop, v. 67, n. 11, p. 1127-1138, set. 2016.
- ALVARES, C.A.; *et al.* Köppen's Climate Classification Map For Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Piracicaba, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANSELMO, J. L.; COSTA, D. S.; SÁ, M. E. Plantas de cobertura para região do Cerrado: **Plantas de cobertura 2013/2014**, São Paulo, cap. 25, p. 178-183, 2014.
- ARGENTON J.; *et al.* Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 425-435, jun. 2005.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/solos/sibcs>. Acesso em: 11 mai. 2023.
- BACK, A.J.; *et al.* O reconhecimento do terraceamento como prática de agricultura conservacionista em Santa Catarina, Brasil. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba. v.7, n.12. 2021.
- BATISTA, A. M.; *et al.* Efeito da adubação verde na estabilidade de agregados de um solo sob cultivo de hortaliças orgânicas na região de Capim Branco – MG. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 11 n. 22, dez. 2015.
- BATTISTI, F. **Implantação e monitoramento preliminar de microbacia hidrográfica rural no Sudoeste do Paraná**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Programa de Pós- Graduação em Agroecossistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2020.
- BENGOUGH, A. G; MULLINS, C. E. The resistance experienced by roots growing in a pressurised cell. A reappraisal. **Plant and Soil**, [s.l.], v. 123, p. 73-82, 1990.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 70. ed. Rio de Janeiro: Ícone, 2010.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 2a edição. São Paulo: Ícone, 1999.
- BICALHO, I. M. Um Estudo da Densidade do Solo em Diferentes Sistemas de Uso e Manejo. **Enciclopédia Biosfera-Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 7, n.12, p. 01 – 09, 2011.

BITAR, O. Y.; ORTEGA, R. D. **Gestão Ambiental**. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998.

BLUM, E.H.; SCHAD, P.; NORTCLIFF, S. **Essentials of Soil Science: Soil formation, functions, use and classification** (World Reference Base, WRB), Swabian, 2018.

BOARDMAN, J.; EVANS, R. The measurement, estimation, and monitoring of soil erosion by runoff at the field scale: challenges and possibilities with reference to Britain. **Progress in Physical Geograph**y, [s.l.], v. 44, n. 1, p. 31-49, 2019.

BOARDMAN, J.; FAVIS-MORTLOCK, D. T. The significance of drilling date and crop cover with reference to soil erosion by water, with implications for mitigating erosion on agricultural land in Southeast England. **Soil Use Manage**, [s.l.], v. 30, p. 40-47, 2014.

BOCALETI, L.H.; *et al.* Sustentabilidade agrícola e saúde do solo. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s.l.], v. 12, n. 5, mai. 2021.

BOLLIGER, A. *et al.* Taking stock of the Brazilian “zero-till revolution”: A review of landmark research and farmers’ practice. **Advances in agronomy**, [s.l.], v. 91, p. 47–110, 2006.

BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 46, p. 438-441, 1982.

BOWMAN, M. S.; Zilberman, D. Economic factors affecting diversified farming systems. **Ecology And Society**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 33-46, 2013.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BRANDÃO, V. S.; *et al.* **Infiltração de água no solo**. Viçosa: UFV, 118 p., 2006.

BRASIL. **Lei n. 8.014, de 14 de dezembro de 1984**. Dispõe sobre a preservação do solo agrícola e adota outras providências. Brasília: Casa Civil, 2012. Disponível em: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/bra179482.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2023.

BRASIL. **Lei n. 9.605, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm. Acesso em: 11 mai. 2023.

BRSCAN, I. M.; LAMOGLIA, J.; OLIVEIRA, E. H. **Embrapa demonstra vantagens do plantio direto, da subsolagem e da integração lavoura-pecuária**. 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/3162901/embrapa-demonstra-vantagens-do-plantio-direto-da-subsolagem-e-da-integracao-lavoura-pecuaria>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BUSSCHER, W.J.; *et al.* Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Till. Res.**, [s.l.], v. 43, p. 205-217, 1997.

CABREIRA, M. A. F. **Levantamento de solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Dois Vizinhos**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2015.

CALDAS, V. I. S. P.; SILVA, A. S.; SANTOS, J. P. C. **Suscetibilidade a Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica Lagos – São João, no Estado do Rio de Janeiro – Brasil, a partir do Método AHP e Análise Multicritério**. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jefferson-Santos-11/publication/337448708_Suscetibilidade_a_Erosao_dos_Solos_da_Bacia_Hidrografica_Lagos_Sao_Joao_no_Estado_do_Rio_de_Janeiro_Brasil_a_partir_do_Metodo_AHP_e_Analise_Multicriterio_Susceptibility_to_Erosion_of_Soils_of_the_La/links/5dd9dcc692851c1fedaca589/Suscetibilidade-a-Erosao-dos-Solos-da-Bacia-Hidrografica-Lagos-Sao-Joao-no-Estado-do-Rio-de-Janeiro-Brasil-a-partir-do-Metodo-AHP-e-Analise-Multicriterio-Susceptibility-to-Erosion-of-Soils-of-the.pdf. Acesso em: 05 maio 2023.

CANALLI, L. B. S.; *et al.* Production and profitability of crop rotation systems in southern Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, [s.l.], v. 41, n. 6, p. 2541-2541, set. 2020.

CARDOSO, E. G.; *et al.* Distribuição do sistema radicular da cultura da soja em função do manejo do solo. *In*: XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais**. Ribeirão Preto, UNESP, 2003.

CARDOSO, F.P. **Plantio direto**: Informações Agronômicas, 2000.

CARDOSO, L. S.; *et al.* **Análise da estiagem na safra 2019/2020 e impactos na agropecuária do Rio Grande do Sul**. 2020. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202011/10163507-14095649-circular-06-cardoso-et-al-para-publicacao.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.

CARNEIRO, S.P. **Qualidade de um Latossolo vermelho sob diferentes tipos de usos e manejos em áreas do cerrado**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia e Análise Ambiental- Programa de Pós- Graduação em Geografia e Análise Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais – Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2010.

CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. **Sistema plantio direto**: Evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. *In*: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5, p.333-370, 2007.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistema de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.527-38, 1998.

CHAVEIRO, A.; *et al.* Qualidade física e química do solo em sistema de plantio direto cultivado com hortaliças – Uma revisão. **Research, Society And Development**, v. 11, n. 9, p. e32711931564, 2022.

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l], v. 7, p. 197-201, 1983.

COLLARES, G. L. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008.

COLOMBO, G. A.; *et al.* Atributos físicos de um latossolo vermelho-amarelo distrófico sob diferentes sistemas de manejo no cerrado tocantinense. **Campo Digital**, [s.l], v. 12, n. 1, 2017.

CORTEZ, J. W.; *et al.* Atributos agronômicos da soja e resistência à penetração em plantio direto e escarificado. **Revista Engenharia Agrícola**, [s.l], v. 37, n. 1, 2017.

CPTEC-INPE. **Centro de Previsão Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 10 mai, 2023.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. **Mercury intrusion method**. In: KLUTE A. (ed.). *Methods of Soil Analysis Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2a .ed. Madison: ASA/SSSA, p. 457-461, 1986.

DENARDIN, J. E.; *et al.* **Manejo de enxurrada em sistema plantio direto**. 2005. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355291/11341263/Livro+-+Manejo+de+Enxurrada+em+Sistema+de+Plantio+Direto.pdf/01c6e4c1-657d-4f0c-87e3-aace4661296c?version=1.0>. Acesso em: 15 mai. 2023.

DHALIWAL, *et al.*, Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. **Environmental and Sustainability Indicators**, [s.l], p. 1-2, 2019.

DIAS JÚNIOR, M.S. **Compactação do solo**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.53-94, 2000.

FAVARATO, L. F.; *et al.* Atributos químicos do solo sobre diferentes plantas de cobertura no sistema plantio direto orgânico. **Brazilian Journal of Sustainable Agriculture**, [s.l], v. 5, n. 2, 2015.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA – **FEBRAPDP**. **Histórico**. 2019. Disponível em: <https://febrapdp.org.br/historico>. Acesso: 05 mai, 2023.

FERRARI, J. M. S.; *et al.* Análise da variabilidade espacial da resistência à penetração do solo em diferentes profundidades. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, [s.l], v. 12, n. 2, p. 164-175, 2018.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de micro-ondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l], v. 23, p. 991-996. 1999.

FERRO- VÁZQUEZ, C. *et al.* When is a terrace not a terrace? The importance of understanding landscape Evolution in studies of terraced agriculture. **Journal of Environmental Management**. [s.l], v. 202, p. 500-512, 2017.

FLAUZINO, B.K. **Degradação do solo pela erosão hídrica e capacidade de uso em sub-bacia hidrográfica piloto no sul de Minas Gerais**. 2012. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. **Particle density**. *In*: DANE, J.H; TOPP, G.C., ed. *Methods of soil analysis: part 4 – physical methods*. Madison, American Society of America, p.229- 240, 2002.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l], v. 38, n. 8, p. 947-953, ago. 2003.

GASPARETTO, N.V.L. As formações superficiais do noroeste do Paraná e sua relação com o Arenito Caiuá. 1992. Tese (Doutorado em Geociências) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

GASSEN, D. A adubação verde e o plantio direto. **Revista Plantio Direto**. 2010.

GASSEN, D. N; GASSEN, F. R. **Plantio direto: o caminho do futuro**. Passo Fundo: Aldeia Sul, 1996.

GOUDIE, A. S. Human impact. *In*: GOUDIE, A.; MIGÓN, P. (eds.). *Landscapes and landforms of England and Wales*. **World Geomorphological Landscapes**. Springer Nature Switzerland AG, 2020.

GUGEL, R. F. *et al.* Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de uso na bacia hidrográfica escola da UTFPR-DV. *In*: Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017.

GUERRA, A. J. T. **Erosão dos solos e movimentos de massa: abordagens geográficas**. Curitiba: CRV, 2016.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. Mapping hazard risk. **Geography Review**, [s.l.], v.22, n.3, p. 11-13, 2009.

GUERRA, A.J.T. **Experimento e monitoramento em erosão dos solos**. Revista do Departamento de Geografia. 2005.

HAKANSSON, I.; VOORHESS, W.B. **Soil compactation**. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. & STEWART, B.A., eds. Methods for assessment of soil degradation. Boca Raton, Lewis Publishers, p.167-179, 1998.

HE, Y.; *et al.* A modelling approach to evaluate the long-term effect of soil texture on spring wheat productivity under a rainfed condition. **Scientific reports**, [s.l.], v. 4, p. 1-12, 2014.

HILLEL, D. **Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations**. Elsevier. Massachusetts, USA, 494p, 1998.

HORN, R. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, Países Baixos, v. 17, n. 3-4, p. 265-289, 1990.

IONITA I.; *et al.* Gully erosion as a natural and human-induced hazard. **Nat. Hazards**. [s.l.], v. 79, n. 1, p. 1–5, 2015.

JAT, H. S., *et al.* Effects of tillage, crop establishment and diversification on soil organic carbon, aggregation, aggregate associated carbon, and productivity in cereal systems of semi-arid Northwest India. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 190, p. 128-138, 2019.

KAZMIERCZAK, R. **Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo em sistemas de preparo**. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018.

KIELING, A. S. **Plantas de cobertura em sistema de plantio direto de tomate: efeitos sobre plantas espontâneas, atributos do solo e a produtividade de frutos em um processo de transição agroecológica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas. Centro de Ciências Agrárias, UFSC, Florianópolis, 2007.

KLANOVICZ, J.; MORES, L. A sojização da agricultura moderna no Paraná, Brasil: uma questão de história ambiental. **Revista Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**. [s.l.], v.6, n.2, ago. 2017.

KLEIN, V.A.; *et al.* Metodologias de controle de qualidade de análises granulométricas do solo. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 43, p. 850-853, 2013.

KLEIN, V.A. Densidade relativa - Um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista Ciência Agrônômica**, [s.l.], v. 5, p. 26-32, 2006.

KISCHENER, M.A; *et al.* História da agricultura no sudoeste do paraná: percep es e reflexões a respeito da mercantiliza o e da moderniza o. **Gestão e Desenvolvimento em Revista**. [s.l.], v.1, n.2, p.85-100, dez 2015.

KUHN, N. J.; GREENWOOD, P.; FISTER, W. Use of field experiments in soil erosion research. *In*: THORNBUSH, M. J.; ALLEN, C. D.; FITZPATRICK, F. A. (ed.). Geomorphological Fieldwork. **Developments in Earth Surface Processes**, [s.l.], v. 18, p. 175-200, 2014.

LAL, R. Physical management of the soils of the tropics: priorities for the 21st century. **Soil Science**, Baltimore, v. 165, n. 3, p.191-207, 2000.

LAL, R.; *et al.* The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. **J. Soil and Water Conservation**, [s.l.], v. 73, n. 6, p. 145-15, 2018.

LANA, M. A. **Uso de culturas de cobertura no manejo de comunidades de plantas espontâneas como estratégia agroecológica para o redesenho de agroecossistemas**. 2007. Disserta o (Mestrado em Agroecossistemas) - Programa de Pós-Gradua o em Agroecossistemas. Centro de Ciências Agrárias, UFSC, Florianópolis, 2007.

LEPSCH, I. F.; *et al.* **Manual para levantamento utilitário e classifica o de terras no sistema de capacidade de uso**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2015.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no Solo.  gua no solo. Edusp, SP, v. 61, 71p, 2005.

LIMA, V. M. P.; *et al.* Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 36, p.71-78, 2012.

LOUREIRO, H.A.S.; *et al.* Monitoramento da erosão hídrica no Brasil: dos métodos manuais aos digitais. **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**, [s.l.], 2022.

LOZANO, L.A. *et al.* Stabilization of soil hydraulic properties under a long term no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 38, n. 4, p. 1281-1292, 2014.

MACHADO, P. L. O. A; WADT, P. G. **Terraceamento**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/13599347/ID01.pdf>. Acesso em: 05 mai, 2023.

MAFRA, N. M. C. Erosão e Planifica o de Uso do Solo. *In*: GUERRA, A.J.T; SILVA, A.S; GARRIDO, B.R. (Org.). **Erosão e Conserva o de Solos**: conceitos, temas e aplica o. 4ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil 301-322

MCLAUGHLIN, N. B.; CAMPBELL, A. J.; OWEN, G. T. Performance of hoe and triple disc furrow openers on no-till grain drills in a fine sandy loam soil. **Soil and Tillage Research**, [s.l.], v. 195, p. 104373, 2019.

MELO, G. M. P.; MELO, V. P.; MELO, W. J. **Metais pesados no ambiente decorrente da aplicação de lodo de esgoto em solo agrícola**. 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/CB5F6214/LODOMETAL.pdf>. Acesso em: mai, 2023.

MESFIN, S., et al. Effects of bench terraces on selected soil physical and chemical properties: landscape improvement for hillside farming in semi-arid areas of northern Ethiopia. **Environmental Earth Sciences**, [s.l.], v. 77, n. 11, p. 1-14, 2018.

MEYER, C. L. **Capacidade de armazenamento e controle da erosão e do escoamento superficial de terraços em nível em sistema plantio direto**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo e Recursos Ambientais) - Curso de Ciência do Solo e Recursos Ambientais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2021.

MIKLOS, A.A.W. “O assassinato do solo”. 1993. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000859860>. Acesso em: 14 mai, 2023.

MIRANDA, J.P.L. **Propriedades físico-hídricas de um solo submetido a cultivos perenes e a pousio em ambiente agrícola serrano- Bom Jardim (RJ)**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Curso de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MIRANDA, M. T; COGO, F. D; VILELA, E. F. **Compactação Do Solo E Dimensionamento De Terraços Em Uma Propriedade Rural Do Sul De Minas Gerais**. 2017. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/intercursosrevistacientifica/article/view/3668/2071>. Acesso em: 10 mai, 2023.

MONDARDO, M.L. Dinâmica migratória do Paraná: caso da região Sudoeste ao longo do século XX. **Revista Brasileira de Estudos de População**, Rio de Janeiro, v.28, n.1, 2011.

MORAES, R. Uma tempestade de luz: a compreensão possibilitada pela análise textual discursiva. **Ciência & Educação**. Bauru, v. 9, n. 2, p. 191-210, 2003.

MUZILLI, O.; *et al.* Comportamento e possibilidades da cultura do milho em plantio direto no estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília. [s.l.], v. 18. 1983.

NACHTIGALL, S.D. NUNES, M.C.M.; MOURA-BUENO, J.M.; LIMA, C.L.R.; MIGUEL, P.; BESKOW, S.; SILVA, T.P. **Modelagem espacial da erosão hídrica do solo associada à sazonalidade agroclimática na região sul do Rio Grande do Sul, Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, V. 25, N. 6, nov-dez 2020.

OGLE, S. M. *et al.* Climate and Soil characteristics Determine Where no-till Management can Store carbon in Soils and Mitigate Greenhouse Gas emissions. **Scientific Reports**, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 1–8, 2019.

OLIVEIRA, D.M.S.; LIMA, R.P.; VERBURG, E.E.J. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquido suíno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, [s.l.], v.19, n.3, p.280–285, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **Status of the World's Soil Resources**. Main Report. Global Soil Resources. P. 38-40, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). Soil Organic Carbon: the hidden potential. 2017. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i6937e/i6937e.pdf>. Acesso em: 11 mai, 2023.

ORTIZ, J. A. M. **Propriedades físicas do solo em sistema de plantio direto: associação com a produtividade da soja e variações em relação a mata nativa**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós- Graduação em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

PIMENTEL D.; *et al.* Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. **Science**, [s.l.], v. 267, n. 5201, p. 1117, 1995.

PAULETTO, E. A.; *et al.* Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v.12, p. 189-195, 1988.

PEDÓ, F. **Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo**. 1986. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

PERCIRA, V.P.; PEREIRA, M.N.; CRUZ, M.C.P. **Solos altamente susceptíveis à erosão**. Jaboticabal. Editora UNESP/SBCS, 1992.

PEREIRA, L. dos S. **Análise Hidroerosiva de Trilha em Encosta e Métodos e Técnicas de Educação Ambiental Visando à Geoconservação**. 2019. Tese (Doutorado em Geografia – Planejamento e Gestão Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M. **Práticas Mecânicas de Conservação do Solo e da Água**. 2 ed. rev. ampl. Viçosa, MG: Editora da UFV, 2006.

POESEN, J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. **Earth Surf. Process. Landf.** [s.l.], v. 43, v.1, p. 64–84, 2018.

PÖTTKER, D.; BEN, J. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 22, n. 4, p. 675–684, 1998.

PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e da água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2009.

- RANZANI, G. **Manual de levantamento de solos**. 2. Ed. São Paulo, Edgard Blusher, 1969.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, [s.l.], v. 27, p. 29-48, 2003.
- REINERT, D. *et al.* Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Santa Maria-RS, v. 32, n. 5, 2008.
- RHEINHEIMER, D. DOS S. *et al.* Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 192, p. 33-41, 2019.
- RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Seminário: Ciências Agrárias**. Londrina-PR, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.
- ROMDHANE, S. *et al.* Cover crop management practices rather than composition of cover crop mixtures affect bacterial communities in no-till agroecosystems. **Frontiers in Microbiology**, [s.l.], v. 10, p. 1618, 2019.
- ROSEMBERG, N.J. Response of plants to the physical effects of soil compaction. **Adv. Agron.**, [s.l.], v. 16, p. 181-196, 1964.
- ROSS, J. L. S.; FIERZ, M. S. M. Algumas técnicas de pesquisa em Geomorfologia. *In*: VENTURI, L. A. B. (org.). **Praticando Geografia – técnicas de campo e laboratório**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- SACHETTI, B.B. **A importância da rotação de culturas para o sistema de plantio direto**. Faculdade da Amazônia. Vilhena, Rondônia. 2020.
- SALOMÃO, P.E.A.; *et al.* The importance of straw no-tillage system for soil restructuring and organic matter restoration. **Research, Society and Development**, [s.l.], v.9, n.1, 2020.
- SAN MARTÍN, C.; *et al.* Spring crops in three-year rotations reduce weed pressure in winter wheat. **Field Crops Research**, [s.l.], 233, 12-20, 2019.
- SANTOS, R. A. **O processo de modernização da cultura no sudoeste do Paraná**. 2008. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós- Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciência e Tecnologia, 2008.
- SANTOS, O. F. Propriedades químicas de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 1, p. 36–42, mar. 2017.
- SÃO PAULO. **Lei nº 8.421, de 23 de novembro de 1993**. Altera a redação de dispositivos da Lei n. 6.171, de 04/07/1988, que dispõe sobre o uso, conservação e preservação do solo agrícola e dá outras providências. São Paulo, 1993. Disponível:

<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1993/lei-8421-23.11.1993.html>. Acesso em: 10 mai, 2023.

SCAPINELLI, A.; *et al.* Sistema radicular e componentes produtivos do girassol em solo compactado. **Bragantia**, Campinas, [s.l.], v. 75, n. 4, p.474-486, 2016.

SILVA, A. S.; *et al.* Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência rural**, [s.l.], v. 44, n. 10, p. 1783-1789, 2014.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H. *et al.* Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na cultura do milho, em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.5: p.75-88, 2006.

SILVA, C.L; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade saturada da superfície de um solo sob Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 32, p. 213-220, 1997.

SILVA, R.B.; *et al.* O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:973-983, 2003.

SILVEIRA, A. L. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica**. In: TUCCI, C.E.M. *Ciclo Hidrologia, ciência e aplicação*. 3ª Ed. Porto Alegre: UFRGS, 2004A. p. 35-51.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; URLANI NETO, V.L. **Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto - modelo IAA/Planalsucar**. Boletim. 1983. Disponível em: <https://www.anais.ueg.br/index.php/sineep/article/view/723/1242>. Acesso em> 11 mai, 2023.

SUZUKI, L.E.A.S.; *et al.* Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, [s.l.], v. 5, p. 64-70, 2015.

SUZUKI, L.E.A.S.; *et al.* Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: Anais da XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. **Anais**. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004.

SUZUKI, L.E.A.S.; *et al.* Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: Anais da XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. **Anais**. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004.

TAROLLI, P.; *et al.* Terraced Landscapes: Land abandonment, soil Degradation and Suitable Management. In: VAROTTO, M.; BONARDI, L.; TAROLLI, P. **World terraced landscapes: History, environment, quality of life**. Springer, 2018.

TEIXEIRA, P. C.; *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2017.

TELLES, T.A; *et al.* **Erosão do solo no estado do Paraná: uma revisão histórica.** XIX Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. Lages – SC, 2012.

THOMAZ, E.L.; ANTONIELI, V. Erosão e degradação do solo em área cultivada com Erva-Mate (*Ilex paraguariensis*). **Geociências**. Guarapuava, v. 27, n.1, 2008.

TORRES, E; SARAIVA, O. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. Embrapa Soja, Londrina-PR, 1999.

THURLER, A. M. **Estimativa da macro e da microporosidade através da granulometria e densidade de partículas e do solo.** 1989. Dissertação. (Mestrado em Agronomia). Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

VALADÃO, F. C. *et al.* Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 39, p. 243-255, 2015.

VAZ, C.M.A. **A questão agrária no Brasil após a sua modernização.** IADES, 2015.

VIDAL-TORRADO, P.; DE CASTO, S. S. **Conceitos e aplicações das relações pedologia e geomorfologia em regiões tropicais úmidas,** 2005.

VIEIRA, L.S. **Manual da ciência do solo.** 1ª Ed, São Paulo, CERES, 1975.

WAIRU, M; LAL, R. Tillage and use effects on soil microporosity in Ohio, USA and Kolombangara, Solomon Islands. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p.80-84, 2006.

WALTRICK, P.C.; *et al.* Estimativa da erosividade de chuvas no estado do paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 a 2008. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 39, p. 256–267, 2015.

WENDLING, B.; *et al.* Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.40, n.5, p.487-494, 2005.

WEISBERGER, D.; NICHOLS, V.; LIEBMAN, M. Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. **Plos One**, [s.l.], v. 14, n. 7, p. 1-12, 2019.

WENDLING, B. et al. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, Uberlândia-MG, v. 28, n. 1, p. 256 – 265, 2012.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **J.Am. Soc. Agr.**, [s.l.], v. 28, p. 337-351, 1936.