

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

MARCO SEGALLA PRAZERES

**CONVERSÃO DE SISTEMAS DE MANEJO À SEMEADURA DIRETA APÓS
LONGO TEMPO DE EROSÃO HÍDRICA NUM CAMBISSOLO HÚMICO**

LAGES, SC

2021

MARCO SEGALLA PRAZERES

**CONVERSÃO DE SISTEMAS DE MANEJO À SEMEADURA DIRETA APÓS
LONGO TEMPO DE EROÇÃO HÍDRICA NUM CAMBISSOLO HÚMICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo, na área de concentração em Caracterização, Conservação e Uso dos Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Ildegardis Bertol.

LAGES, SC

2021

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Prazeres, Marco Segalla

Conversão de sistemas de manejo à semeadura direta após longo tempo de erosão hídrica num Cambisso Húmico / Marco Segalla
Prazeres. -- 2021.

99 p.

Orientador: Ildergardis Bertol

Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina,
Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação
em Ciência do Solo, Lages, 2021.

1. Solo degradado. 2. Conservação do solo. 3. Mudança de
manejo. I. Bertol, Ildergardis. II. Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

MARCO SEGALLA PRAZERES

**CONVERSÃO DE SISTEMAS DE MANEJO À SEMEADURA DIRETA APÓS
LONGO TEMPO DE EROSÃO HÍDRICA NUM CAMBISSOLO HÚMICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo, na área de concentração em Caracterização, Conservação e Uso dos Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Ildegardis Bertol

Banca Examinadora

Orientador:

Prof. Dr. Ildegardis Bertol
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro interno:

Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro interno:

Prof. Dr. David José Miquelluti
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro externo:

Profa. Dra. Maria Aparecida do Nascimento dos Santos
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - UEMS

Membro externo:

Profa. Dra. Danieli Schneiders Kaufmann
Centro Universitário Leonardo da Vinci - UNIASSELVI

Lages, 20 de julho de 2021.

Aos meus pais, Reginaldo José e Maria Bernardete e minha irmã Camila, exemplos de vida, que me encorajam a cada desafio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador deste Universo. A vida e a saúde que me possibilitam seguir nos desafios da vida.

Aos meus pais, Reginaldo José Prazeres e Maria Bernardete Segalla, pela educação que me deram e exemplo para persistir nos meus propósitos. Eles são os meus alicerces.

A minha irmã Camila Segalla Prazeres, a quem devo muito aprendizado e gratidão.

Ao meu orientador, professor Dr. Ildegardis Bertol, pela amizade, por me orientar ao longo destes anos e me transmitir ânimo e conhecimentos.

Ao corpo docente da UDESC pelos ensinamentos e oportunidades.

Aos meus amigos, Venesa Pinto dos Santos, Marco Frühalf de Oliveira, Artur Kauling, Filipe Antônio Wroblewski, Gustavo Ferreira de Oliveira, Diego Fernando Roters, Walquíria Chaves da Silva, Matheus Diel Curvelo, Agna Letícia Botelho Figueiredo, Bárbara Bagio e a todos os demais que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa.

Ao CNPq por parte dos recursos financeiros destinados à pesquisa e pela bolsa de pesquisa destinada ao Professor Orientador.

A FAPESC por parte dos recursos financeiros destinados à pesquisa.

RESUMO

A conversão de diferentes sistemas de manejo do solo com histórico de degradação física e química causada pela erosão hídrica pluvial para o sistema de semeadura direta pode resultar na involução deste processo com a recuperação da capacidade produtiva do solo no médio e longo prazo. Por isso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a ocorrência de erosão hídrica pluvial e a produtividade de milho e as mudanças nas propriedades físicas e químicas de um Cambissolo Húmico, entre o quarto e o sexto ano após a conversão de diferentes sistemas de manejo do solo para a condição de semeadura direta, em pesquisa conduzida entre abril de 2018 e março de 2021, em Lages, SC. A conversão de manejo do solo para a condição de semeadura direta foi realizada há seis anos, partindo-se dos seguintes manejos tradicionais que haviam sido conduzidos por vinte e seis anos e meio: semeadura direta sem preparo prévio do solo, com manejo anterior também sob semeadura direta sem preparo prévio, constituindo a testemunha (SD/SD); semeadura direta sem preparo prévio do solo, implantada após rotação de preparos (RP/SD); semeadura direta sem preparo prévio do solo, implantada após cultivo mínimo (CM/SD); semeadura direta sem preparo prévio do solo, implantada após preparo convencional do solo com uma aração e duas gradagens (PC/SD) e semeadura direta sem preparo prévio do solo, implantada sob solo descoberto e sem cultivo (parcela padrão da USLE/RUSLE) (SC/SD). As coletas para quantificação das perdas de solo (PS) e perdas de água (PA) foram realizadas 112 vezes num período de três anos, em unidades experimentais, ou parcelas, de 3,5 x 22,1 m (77,35 m²), em duas repetições por tratamento, em delineamento experimental inteiramente casualizado. Os tratamentos foram cultivados com um consórcio de espécies destinadas para cobertura do solo, utilizando aveia preta (*Avena strigosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e a ervilhaca comum (*Vicia sativa*), no período de outono/inverno e milho (*Zea mays*) no período de primavera/verão de cada ano. Ao final de cada cultivo foi quantificada a produtividade de massa seca da parte aérea das espécies para cobertura do solo e do milho, e a produtividade de grãos de milho. Ao final da pesquisa foram coletadas amostras de solo para determinação do pH e dos teores de P, K, Ca, Mg e carbono orgânico total (COT) no solo. A densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e estabilidade de agregados em água também foram determinadas na mesma época. Apesar da elevada cobertura superficial presente em todos os tratamentos, as PS apresentaram ampla variação numérica, totalizando 204 kg ha⁻¹ para SD/SD, 313 kg ha⁻¹ para RP/SD, 397 kg ha⁻¹ para CM/SD, 930 kg ha⁻¹ para PC/SD e 1453 kg ha⁻¹ para o tratamento SC/SD. As PA apresentaram diminuição apenas nos tratamentos PC/SD e SC/SD, entretanto,

houve variação relativamente pequena entre os tratamentos e entre os ciclos de cultivo do solo. As propriedades físicas do solo melhoraram entre o quarto e sexto ano, em relação ao primeiro e terceiro ano após a conversão de diferentes sistemas de manejo, inserindo-se a semeadura direta, com reflexos na erosão hídrica pluvial do solo.

Palavras-chave: Solo degradado. Conservação do solo. Mudança de manejo.

ABSTRACT

The conversion of different soil management systems with a history of physical and chemical degradation, caused by rainfall erosion to the no-till system, can result in the involution of this process and recover the soil's productive capacity in the medium and long term. Therefore, the objective of this research was to evaluate the occurrence of rainfall erosion and corn productivity and changes in the physical and chemical properties of a Humic Cambisol, between the fourth and sixth year after the conversion of different soil management systems for the no-till condition, in a survey conducted between April 2018 and March 2021, in Lages, SC. The conversion of soil management to the condition of no-tillage was carried out six years ago, starting from the following traditional managements that had been carried out for twenty-six and a half years: no-tillage without previous soil preparation, with previous management also under no-tillage without prior preparation, constituting the control treatment (NT/NT); direct seeding without previous soil preparation, implemented after rotation of tillage (RT/NT); direct sowing without prior soil preparation, implemented after minimum cultivation (MC/NT); direct seeding without prior soil preparation, implemented after conventional soil preparation with one plow and two harrowing (CP/NT) and direct seeding without prior soil preparation, implemented under bare soil and without cultivation (USLE/RUSLE standard plot) (SC/NT). Samples for quantification of soil losses (SL) and water losses (WL) were carried out 112 times in a period of three years, in experimental units, or plots, of 3.5 x 22.1 m (77.35 m²), in two replicates per treatment, in a completely randomized design. The treatments were cultivated with a consortium of species intended for ground cover, using black oat (*Avena strigosa*), forage radish (*Raphanus sativus*) and common vetch (*Vicia sativa*), in the autumn/winter period and corn (*Zea mays*) in the spring/summer period of each year. At the end of each cultivation, the dry mass yield of the species for ground cover and corn, and corn grain yield were quantified. At the end of the research, soil samples were collected to determine the pH and the contents of P, K, Ca, Mg and total organic carbon (TOC) in the soil. Soil density, total porosity, macroporosity, microporosity and stability of aggregates in water were also determined at the same time. Despite the high surface coverage present in all treatments, soil losses showed wide numerical variation, totaling 204 kg ha⁻¹ for NT/NT, 313 kg ha⁻¹ for RT/NT, 397 kg ha⁻¹ for MC/NT, 930 kg ha⁻¹ for CP/NT and 1453 kg ha⁻¹ for NT/NT treatment. The water losses showed a decrease only in the treatments CP/NT and SC/NT, however, there was a relatively small variation between treatments and between soil cultivation cycles. The physical properties of

the soil improved between the fourth and sixth year, compared to the first and third year after the conversion of different management systems, including no-tillage, with reflexes on soil rainfall erosion.

Keywords: Degraded soil. Soil conservation. Change in management

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Localização do experimento no Campus da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC/Lages - SC. | 34 |
| Figura 2 - Aveia preta (<i>Avena strigosa</i>), nabo forrageiro (<i>Raphanus sativus</i>) e ervilhaca comum (<i>Vicia sativa</i>) em consórcio, no período de outono/inverno (a); milho (<i>Zea mays</i>) solteiro, no período de primavera/verão (b). | 36 |
| Figura 3 - (a) Cultivo mínimo antes da conversão de manejo (CM); b) Cultivo mínimo, seis anos após a conversão de manejo com inserção da sementeira direta (CM/SD). | 40 |
| Figura 4 - (a) Rotação de preparos antes da conversão de manejo (RP); b) Rotação de preparos, seis anos após a conversão de manejo com inserção da sementeira direta (RP/SD). | 40 |
| Figura 5 - (a) Preparo convencional antes da conversão de manejo (PC); b) Preparo convencional, seis anos após a conversão de manejo com inserção da sementeira direta (PC/SD). | 40 |
| Figura 6 - (a) Solo sem cultivo e descoberto antes da conversão de manejo (SC); b) Solo sem cultivo e descoberto seis anos após a conversão de manejo com inserção da sementeira direta (SC/SD). | 41 |
| Figura 7 - (a) Sementeira direta antes da conversão de manejo (SD); b) Sementeira direta, seis anos após a conversão de manejo com inserção da sementeira direta (SD/SD). | 41 |
| Figura 8 - Procedimento de leitura da altura da enxurrada no tanque de sedimentação, com auxílio da régua graduada. | 42 |
| Figura 9 - Teores de carbono orgânico total (COT) (a) e diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) (b) do solo em diferentes tratamentos, em diferentes camadas, em um Cambissolo Húmico (média de duas repetições). | 52 |
| Figura 10 - Relação entre diâmetro médio ponderado de agregados do solo (DMP) e o carbono orgânico total (COT), obtidos em amostras coletadas ao final da pesquisa. | 52 |
| Figura 11 - Aspecto visual das espigas e das hastes de milho nos diferentes tratamentos. | 57 |
| Figura 12 - Teores de fósforo (P) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições). | 66 |
| Figura 13 - Teores de potássio (K) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições). | 67 |
| Figura 14 - Teores de cálcio (Ca) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições). | 68 |
| Figura 15 - Teores de magnésio (Mg) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições). | 69 |
| Figura 16 - pH do solo (em água) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições). | 70 |
| Figura 17 - Densidade do solo (Ds) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições). | 72 |
| Figura 18 - Porosidade total do solo (Pt) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições). | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 - Macroporosidade do solo (Ma) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições)..... | 74 |
| Figura 20 - Microporosidade do solo (Mi) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições)..... | 75 |
| Figura 21 - Carbono orgânico total (COT) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições)..... | 77 |
| Figura 22 - Diâmetro médio ponderado (DMP), nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições)..... | 78 |
| Figura 23 - Perdas anuais de solo (Mg ha^{-1}) em diferentes tratamentos..... | 82 |
| Figura 24 - Perdas anuais de solo (Mg ha^{-1}) em diferentes tratamentos, após conversão de diferentes sistemas de manejos para semeadura direta..... | 83 |
| Figura 25 - Perdas médias anuais de água (%) em diferentes tratamentos..... | 84 |
| Figura 26 - Perdas médias anuais de água (%) em diferentes tratamentos, após conversão de manejos para semeadura direta. | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Características e propriedades físicas e químicas do Cambissolo Húmico Alumínico léptico de Lages (SC), referentes ao perfil no local do experimento. | 35 |
| Tabela 2 - Histórico contendo a descrição dos principais eventos, tipo de manejo e aplicação do corretivo calcário no experimento sobre o Cambissolo Húmico, por etapa entre os anos de 1988 e 2015, em Lages, SC..... | 37 |
| Tabela 3 – Teores de P extraível, K, Ca e Mg trocáveis e valores de pH (H ₂ O) no solo, em diferentes tratamentos e camadas, em Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições). | 47 |
| Tabela 4 - Teores de P extraível, K, Ca, e Mg trocável nos sedimentos perdidos por erosão, em diferentes tratamentos, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições). | 48 |
| Tabela 5 - Taxa de enriquecimento em P extraível, K, Ca e Mg trocável, em diferentes tratamentos, Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições)..... | 49 |
| Tabela 6 - Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Ma), microporos (Mi) em diferentes tratamentos, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico (média de duas repetições). | 50 |
| Tabela 7 - Massa seca da parte aérea produzida pelo cultivo consorciado de ervilhaca, nabo forrageiro e aveia preta, em cada tratamento para os ciclos de cultivo de 2018, 2019 e 2020 e milho para os ciclos de cultivo 2018/2019. 2019/2020 e 2020/2021. | 54 |
| Tabela 8 - Produtividades de grãos (PG) e massa de mil grãos (MMG) de milho em cada tratamento, para o ciclo de cultivos 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021 (média das repetições). | 55 |
| Tabela 9 - Altura de planta, altura de inserção da espiga, diâmetro de colmo, comprimento de espiga, diâmetro de espiga, número de fileiras por espiga e número de grãos por fileira, em diferentes tratamentos, para os ciclos de cultivos 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021. | 56 |
| Tabela 10 - Valores mensais do número e altura de chuvas erosivas, não erosivas e o total de chuvas observadas entre abril de 2018 e março de 2021, em Lages – SC. | 58 |
| Tabela 11 - Valores de altura de chuva (AC) e de perdas de solo (PS) por ciclo de cultivo e totais no período de 2018 a 2021, (média de duas repetições) em Cambissolo Húmico, em Lages – SC..... | 60 |
| Tabela 12 - Valores de altura de chuva (AC) e de perdas de água (PA) em relação ao total de chuva por ciclo de cultivo e totais no período de 2018 a 2021, (média de duas repetições) em Cambissolo Húmico, em Lages – SC..... | 62 |
| Tabela 13 - Valores individuais de altura (AC) de chuvas erosivas, perdas de água médias observadas entre o quarto e sexto ano, após conversão de diferentes manejos para semeadura direta (média de duas repetições) em Cambissolo Húmico..... | 63 |
| Tabela 14 - Massa seca da parte aérea produzida pelo cultivo consorciado de ervilhaca, nabo forrageiro e aveia preta, em cada tratamento para os ciclos de cultivo de 2018, 2019 e 2020 e milho para os ciclos de cultivo 2018/2019. 2019/2020 e 2020/2021. | 79 |
| Tabela 15 - Produtividades de grãos (PG) e massa de mil grãos (MMG) de milho em cada tratamento, para o ciclo de cultivos 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021 (média das repetições). | 81 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 2.1 EROÇÃO DO SOLO | 18 |
| 2.2 EROÇÃO HÍDRICA PLUVIAL DO SOLO | 18 |
| 2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A EROÇÃO HÍDRICA PLUVIAL DO SOLO | 19 |
| 2.4 EFEITOS DA MUDANÇA DE MANEJO NAS PROPRIEDADES DO SOLO PREVIAMENTE DEGRADADO | 23 |
| 2.5 QUALIDADE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO | 26 |
| 2.6 QUALIDADE DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO | 27 |
| 2.7 EFEITOS DA EROÇÃO HÍDRICA NO RENDIMENTO DE CULTURAS EM SOLO PREVIAMENTE DEGRADADO | 29 |
| 3 HIPÓTESES | 32 |
| 4 OBJETIVOS | 33 |
| 4.1 GERAL | 33 |
| 4.2 ESPECÍFICOS | 33 |
| 5 MATERIAL E MÉTODOS | 34 |
| 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO, DO CLIMA LOCAL E DO SOLO | 34 |
| 5.2 UNIDADE EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS | 35 |
| 5.3 HISTÓRICO DE MANEJO E CULTIVO DO SOLO NA ÁREA EXPERIMENTAL | 37 |
| 5.4 QUANTIFICAÇÃO DA EROÇÃO HÍDRICA | 41 |
| 5.5 DETERMINAÇÕES FÍSICAS NO SOLO | 43 |
| 5.6 DETERMINAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO | 44 |
| 5.7 AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO VEGETAL | 45 |
| 5.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA | 45 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 46 |
| 6.1 SEÇÃO 1 | 46 |
| 6.1.1 Caracterização química e física do solo e dos sedimentos da erosão | 46 |
| 6.1.1.1 <i>Fósforo, potássio, cálcio, magnésio e pH do solo</i> | 46 |
| 6.1.1.2 <i>Fósforo, potássio, cálcio e magnésio nos sedimentos perdidos por erosão</i> | 48 |
| 6.1.1.3 <i>Taxa de enriquecimento em fósforo, potássio, cálcio e magnésio</i> | 49 |
| 6.1.1.4 <i>Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total</i> | 49 |
| 6.1.1.5 <i>Carbono orgânico total e diâmetro médio ponderado de agregados do solo</i> | 51 |
| 6.1.2 Produção vegetal | 53 |
| 6.1.2.1 <i>Massa seca da parte aérea</i> | 53 |
| 6.1.2.2 <i>Produtividade de grãos do milho</i> | 54 |
| 6.1.2.3 <i>Aspectos visuais da produção de milho</i> | 56 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1.3 Características das chuvas naturais | 57 |
| 6.1.3.1 <i>Número e altura de chuvas</i> | 57 |
| 6.1.4 Erosão hídrica pluvial do solo | 59 |
| 6.1.4.1 <i>Perdas de solo</i> | 59 |
| 6.1.4.2 <i>Perdas de água</i> | 61 |
| 6.2 SEÇÃO 2 | 64 |
| 6.2.1 Condições químicas e físicas do solo | 64 |
| 6.2.1.1 <i>Fósforo, potássio, cálcio, magnésio e pH</i> | 64 |
| 6.2.1.2 <i>Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade</i> | 71 |
| 6.2.3 Carbono orgânico total e diâmetro médio ponderado de agregados | 76 |
| 6.3 PRODUÇÃO VEGETAL | 79 |
| 6.3.1 Massa seca da parte aérea | 79 |
| 6.3.2 Produtividade de grãos do milho | 80 |
| 6.4 EROSIÃO HÍDRICA PLUVIAL DO SOLO | 81 |
| 6.4.1 Perdas de solo | 81 |
| 6.4.2 Perdas de água | 83 |
| 7 CONCLUSÕES | 86 |
| 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 87 |
| REFERÊNCIAS | 89 |

1 INTRODUÇÃO

A agricultura, a pecuária e as atividades extrativistas fazem parte de setores primários da economia brasileira. Por um lado, o aspecto financeiro destas atividades é importante e, por outro, deve haver forte preocupação ambiental e social. Considerando o aspecto econômico, o uso intensivo do solo acelera sua degradação, principalmente pela erosão hídrica que empobrece o solo no local de origem da erosão, diminui sua capacidade produtiva e aumenta o custo de produção. Considerando o aspecto ambiental, a erosão hídrica é responsável pelo impacto fora do local de sua ocorrência. Nesse local, ocorre assoreamento devido ao depósito de sedimentos constituídos das frações mineral e orgânica e enriquecimento devido ao depósito dos nutrientes transportados pela erosão. Sedimentos e nutrientes podem ser depositados no solo e nos mananciais de água de superfície. No caso de depósito nos mananciais, merece atenção especial o efeito de eutrofização causado pelo fósforo (P).

A erosão do solo no Brasil é relatada desde o século XIX. O padrão de riqueza baseado no resultado dos pacotes tecnológicos decorrentes da *revolução verde* ocorrida a partir da década de 1960 estimulou a monocultura e a mecanização intensiva do solo. Isso criou condições para os agricultores utilizarem intensamente o recurso natural solo, na maioria das vezes acima da capacidade de uso das terras, acelerando sua degradação. O uso massivo de insumos químicos mascarou, em parte, a redução da capacidade produtiva do solo devido à erosão, criando a falsa sensação de sustentabilidade desse sistema produtivo. Atualmente, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2019) estima que em 1/3 das terras do mundo o solo apresenta degradação.

O preparo do solo com revolvimento intenso, usando arado e grade de discos, denominado preparo convencional (PC), foi o manejo mais empregado à época de intensificação do sistema produtivo decorrente da *revolução verde*. O PC proporcionava distribuição de fertilizantes e corretivos na camada arável do solo e facilitava o crescimento das raízes das plantas dentro dessa camada. Por outro lado, desagregava o solo na superfície e o compactava abaixo da camada preparada, dificultando a infiltração de água, aumentando o escoamento superficial e a erosão hídrica, conseqüentemente. Assim, aumentava em muito as perdas de água (PA) e as perdas de solo (PS) que facilmente ultrapassavam os limites determinados pela tolerância de perda de solo.

A semeadura direta (SD), um sistema de manejo eficaz em controlar a erosão, principalmente as PS e menos as PA, deu origem a uma nova fase no controle da erosão

hídrica e na conservação do solo, expandindo-se por boa parte do território nacional. A partir da década de 1980, a SD, que vinha sendo praticada experimentalmente desde a década de 1960, foi definitivamente ampliada e passou a dominar o sistema produtivo, predominantemente com cultivo de soja (*Glycine max*) no verão e trigo (*Triticum aestivum*) no inverno.

A adoção da SD como forma de manejo conservacionista permitiu a inserção ao processo produtivo das áreas previamente degradadas pela erosão devido ao PC. Isso voltou a fortalecer economicamente a atividade agrícola. No entanto, percebeu-se que a SD, por si só não era capaz de recuperar, ou de restaurar o solo previamente degradado. A percepção dessa deficiência da SD foi em parte mascarada pelo uso cada vez mais massivo de insumos químicos de todas as naturezas e de sementes melhoradas que resultavam em alta produtividade das culturas mesmo em solos degradados, mas com custos cada vez maiores, tanto do ponto de vista financeiro, quanto ambiental.

Um modelo de agricultura conservacionista ainda está sendo buscado no Brasil, que, ao mesmo tempo, possibilite restaurar solos degradados e permita obter ganhos econômicos, sociais e ambientais. Assim, entre 1988 e 2014 a erosão hídrica foi quantificada em um experimento para avaliar as perdas de solo e água. Nesse experimento estudava-se a SD, cultivo mínimo (CM), rotação de preparos (RP), PC e solo sem cultivo e descoberto (SC) em um Cambissolo Húmico, no município de Lages - SC. Após 26 anos e meio de pesquisa desses sistemas de manejo, procedeu-se a conversão do CM, RP, PC e SC para a SD. A SD antiga foi mantida com a mesma condição (SD), como testemunha. Nessa fase da pesquisa cultivou-se milho no verão e espécies de cobertura (cultivo consorciado de ervilhaca, aveia e nabo forrageiro) no inverno, comparando-os com a SD consolidada. Assim, passou-se a avaliar a erosão, a produtividade do milho, a produção de massa seca das espécies de cobertura e os indicadores físicos e químicos do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EROSÃO DO SOLO

O declínio de antigas civilizações está relacionado ao mau uso do solo, que resultou em processos erosivos de elevada magnitude e, em muitos casos irreversíveis. O norte da China, o nordeste de Bagdá e a Mesopotâmia são exemplos de regiões que se tornaram grandes desertos, em virtude da erosão do solo induzida pelas atividades do homem (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

A erosão do solo é um processo natural, que pode ser definido como desgaste do solo. Este processo ocasionado pelos agentes erosivos diretos, água e vento e, pelos agentes indiretos, temperatura, atividade biológica e o degelo, ocorrem em três fases distintas e concomitantes, quais sejam: desagregação, transporte e deposição (ELLISON, 1947).

Para causar erosão no solo, a água precisa estar em movimento, por isso a água dos rios, mares, neve e geleiras possuem capacidade de erodir o solo. Outro agente ativo neste processo é o vento, que possui capacidade de iniciar o movimento das partículas de solo e transportá-las para locais distantes. Regiões planas e áreas com declive, contando que sejam áridas e semiáridas estão sujeitas a esta forma de erosão, principalmente quando a vegetação natural é reduzida. O processo de erosão eólica consiste em três fases distintas: início do movimento, transporte e deposição. Os agentes indiretos neste processo atuam “perturbando” o solo e acelerando o efeito erosivo da água e do vento (BERTOL; CASSOL; BARBOSA, 2019, p. 453).

A erosão ocorre de duas formas, natural ou induzida. A erosão natural ou geológica ocorre sem interferência antrópica e por longos períodos, cujos processos que desgastam e removem o solo estão em equilíbrio dinâmico com os processos de formação e reposição deste, sendo uma erosão útil. A erosão acelerada ou induzida ocorre em períodos curtos, com ação antrópica intensa, onde o equilíbrio com os processos de formação do solo é rompido e as perdas de solo aumentam consideravelmente (SCSA, 1982).

2.2 EROSÃO HÍDRICA PLUVIAL DO SOLO

A erosão hídrica pluvial do solo (EHP) é causada pela chuva e pelo escoamento superficial integrado a ela (WISCHMEIER; SMITH, 1958; HUDSON, 1995). De acordo com as condições de superfície do solo e com a magnitude dos agentes erosivos, a EHP ocorre de duas maneiras, entre sulcos e em sulcos. Na erosão entre sulcos as partículas de solo são

desagregadas pelo impacto das gotas de chuva, e o transporte se dá pelo salpicamento provocado pelas gotas combinado ao fluxo laminar do escoamento superficial. Na erosão em sulcos o escoamento superficial concentrado é o principal responsável pelo transporte e, secundariamente, pela desagregação dos sedimentos principalmente na base do sulco (MEYER et al., 1975; FOSTER, 1982).

A EHP em solo descoberto se inicia pela desagregação devido ao impacto das gotas de chuva e, em menor grau, devido ao cisalhamento causado pelo escoamento superficial (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Esses dois agentes desagregam e transportam os sedimentos, com eventual deposição dos mesmos fora de seu local de origem (ELLISON, 1947). A ação energética decorrente da ação desses dois agentes desprende as partículas da massa de solo e as tornam disponíveis para o transporte. Na segunda fase, o transporte, a energia contida no escoamento superficial e, em menor grau, no salpico das partículas de solo devido ao impacto das gotas de chuva, remove os sedimentos previamente desagregados do seu local de origem. A deposição é a terceira e última fase da EHP, a qual ocorre quando a capacidade de transporte do fluxo superficial torna-se inferior à carga de sedimentos presentes no escoamento superficial ou quando ocorre o cessamento da chuva e/ou paralisação do escoamento (HUDSON, 1995). As partículas se depositam de maneira seletiva ao longo do comprimento do declive, sendo as de maior diâmetro e/ou densidade, depositadas inicialmente (ELLISON, 1947).

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A EROSÃO HÍDRICA PLUVIAL DO SOLO

A EHP empobrece o solo e pode contaminar o ambiente, dependendo dos fatores que a influenciam: clima (chuva), solo, topografia do relevo, cobertura e manejo do solo e práticas conservacionistas de suporte (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Esses fatores são representados pela erosividade da chuva (fator R), erodibilidade do solo (fator K), topografia do relevo (fator LS), cobertura e manejo do solo (fator C) e práticas conservacionistas de suporte (fator P), as quais compõem a Equação Universal de Perda de Solo – USLE e a Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD et al., 1997).

A capacidade potencial das gotas de chuva e a turbulência causada pela velocidade do escoamento superficial da água que atuam como fonte de energia no processo erosivo (WISCHMEIER; SMITH, 1958) é definida como erosividade da chuva (fator R da USLE/RUSLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD et al., 1997). No Brasil, a erosividade média anual (fator R da USLE/RUSLE) foi determinada em diferentes regiões.

No Sul, Beutler et al. (2003), Eltz et al. (2011) e Schick et al. (2014a) obtiveram média anual do índice de erosividade em 10.005, 5.534 e 5.033 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ para Chapecó (SC), Encruzilhada do Sul (RS) e Lages (SC), respectivamente. Para diferentes regiões do estado do Paraná, Waltrick et al. (2015) estimaram a erosividade das chuvas por interpolações geoestatísticas entre 5.449 e 12.581 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Na região Sudeste do país, Val et al. (1986), Carvalho et al. (1989) e Marques et al. (1998) determinaram média anual do fator R em 6.843, 7.747 e 5.835 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ para Lavras (MG), Mococa (SP) e Sete Lagoas (MG), respectivamente. Nas cidades de Manaus (AM) (Norte) e Caruaru (PE) (Nordeste), a erosividade média anual observada foi 14.129 e 2.100 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, de acordo com Oliveira Junior & Medina (1990) e Margolis et al. (1985), respectivamente, caracterizando uma ampla variação espacial do índice EI₃₀ no território brasileiro.

O solo é o fator passivo na EHP, visto que ele sofre a ação energética da chuva combinada com o escoamento superficial da água (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD et al., 1997). A capacidade do solo em resistir ao processo erosivo é definida como erodibilidade do solo (fator K da USLE/RUSLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD et al., 1997). Para um Nitossolo Háplico o fator erodibilidade do solo foi determinado em 0,011 Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ (BERTOL et al., 2007), em Cambissolo Húmico aluminoso, argiloso, com substrato composto de siltitos e argilitos a erodibilidade do solo foi determinado por Schick et al. (2014b) em 0,0175 Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹. Por outro lado, Albuquerque et al. (2005) constataram valores de K em 0,013 Mg ha h MJ⁻¹ mm⁻¹ em um Luvisolo Hipocrômico órtico no município de Sumé (PB). Tendo como base solos americanos, Foster et al. (1981) indicaram valores de 0,010; 0,030; e 0,060 Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ para classificar a erodibilidade como baixa, moderada e alta, respectivamente. Portanto, solos de alta erodibilidade, por exemplo, apresentam pouca resistência natural à erosão hídrica.

O fator LS é composto pelos fatores comprimento de rampa (L) e inclinação (grau) do declive (S). Mesmo avaliados de forma separada, nos estudos da EHP se agrupam em único fator (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Quanto mais longo o comprimento de declive e maior a declividade do terreno, maior será o potencial do escoamento superficial causar o cisalhamento do solo (BARBOSA et al., 2012). Com a duplicação do comprimento do declive, as perdas de solo aumentam 1,5 vezes, aproximadamente (WISCHMEIER; SMITH, 1978), enquanto as perdas de solo são aumentadas em 2,5 vezes com a duplicação da inclinação do declive, na média, em solo descoberto (HUDSON, 1995). Na condição de solo sem cultivo e descoberto, as perdas de solo aumentam linearmente com o aumento da erosividade das chuvas naturais (BAGARELLO; FERRO, 2010). Isto ocorre porque a

ausência de proteção do solo permite que a energia erosiva das chuvas possa potencializar a sua capacidade máxima de produzir erosão (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

O fator cobertura e o manejo do solo (fator C da USLE/RUSLE) é o mais importante no processo de EHP e resulta do efeito da cobertura do solo em si, das operações mecânicas realizadas com o fim de adequar o solo ao cultivo e, da variação temporal da erosividade das chuvas sobre um mesmo tipo de solo (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A cobertura do solo compreende a cobertura exercida pela copa das plantas e resíduos culturais, enquanto o manejo do solo é representado pelo preparo mecânico e pelas demais operações realizadas no solo durante os ciclos de cultivo. O efeito da cobertura do solo exercida pela copa das plantas diminui a superfície exposta ao impacto das gotas de chuva, dissipando sua energia na altura do dossel acima da superfície, praticamente sem efeito sobre a energia do escoamento superficial da água no nível do solo (WISCHMEIER; SMITH, 1978). É importante destacar que a água que, incide sobre a copa das plantas, após ser interceptada, cai na superfície do solo na forma de gotas, readquirindo velocidade e energia cinética, por isso, o efeito de cobertura do solo pela copa das plantas é influenciado pelo tipo e estágio de desenvolvimentos das culturas que determinam a densidade do dossel (AMARAL, 2006), a qual dissipa a energia cinética das gotas de chuva (MANNERING; MEYER, 1962). Também, as plantas influenciam indiretamente a EHP pelo efeito das raízes no solo. As raízes melhoram a estrutura e aumentam a resistência ao sulcamento, com isso, dissipam, em parte, a energia cinética do escoamento superficial (AMARAL et al., 2008).

A cobertura do solo pelo resíduo cultural em contato direto com a superfície, apresenta maior efeito na redução da EHP do que a cobertura pela copa das plantas (WISCHMEIER; SMITH, 1978; HUDSON, 1971). O resíduo cultural reduz ou elimina a superfície exposta ao impacto das gotas, dissipa a energia das gotas de chuva no nível do solo e, em parte, dissipa a energia do escoamento superficial (DULEY, 1939). A eficácia dos resíduos culturais, por outro lado, depende de vários fatores, tais como, percentagem de cobertura do solo e tipo, quantidade, forma de manejo e estágio de decomposição dos resíduos (COGO, 1981). Uma cobertura de 60% resulta na redução de 80% das perdas de solo, em relação à ausência de cobertura (BERTOL et al., 1987). Em adição, o resíduo cultural age como barreira física e aprisionam as partículas de solo desagregadas, causando-lhes a deposição e conseqüentemente diminuição da remoção de solo para fora da área da lavoura (LOPES et al., 1987). Por fim, determinar numericamente o fator cobertura e manejo do solo é praticamente impossível, em virtude das inúmeras combinações possíveis de erosividade, cultivo, preparo e manejo, para cada tipo de solo (BERTOL et al., 2001).

Em relação ao manejo do solo, este pode ser conceituado como o conjunto de operações mecânicas e não mecânicas desenvolvidas durante o ciclo de cultivo no solo, com objetivo de proporcionar um ambiente adequado ao desenvolvimento das plantas. A etapa mais importante deste conjunto de operações é o preparo mecânico, pois é a operação inicial e que define a forma como os fertilizantes e corretivos serão distribuídos no solo, o destino dos resíduos culturais e o comportamento das propriedades físicas e químicas do solo. Em termos gerais, pode-se dizer que o preparo do solo se divide em três tipos: preparo convencional (PC) combinando operações de arado e grade; cultivo mínimo (CM) realizado com operações de escarificação e grade; semeadura direta (SD) sem a realização de preparo mecânico previamente à semeadura das culturas. Em cada um desses tipos de preparo ainda podem ocorrer inúmeras variações, dependendo do tipo de equipamento usado e do número de operações realizadas com cada um dos equipamentos num mesmo evento de preparo.

O principal efeito do preparo mecânico do solo é justamente sobre a cobertura. No PC a cobertura do solo é praticamente eliminada com a incorporação dos resíduos vegetais (SCHICK et al., 2000), enquanto a SD mantém praticamente toda biomassa vegetal residual na superfície do solo (BERTOL et al., 2019). O preparo do solo influencia na rugosidade, porosidade total e distribuição de tamanho dos poros do solo. O PC aumenta o volume de macroporos na superfície, enquanto na subsuperfície, causa compactação e diminuição dos macroporos abaixo da camada preparada (BERTOL et al., 2004), além de tornar o solo descoberto e suscetível ao selamento superficial, deixando a superfície desprotegida e propensa à desagregação por impacto das gotas da chuva e ao transporte pelo escoamento superficial de partículas de solo, imediatamente após o início da chuva e do escoamento (FOSTER, 1982).

O CM é conceituado com a quantidade mínima de operações mecânicas desenvolvidas no solo, desde o preparo, até os tratos culturais necessários para o desenvolvimento das plantas. A realização de escarificações e gradagens leves no solo podem se caracterizar como CM o que resulta em elevada rugosidade superficial do solo (COGO et al., 1984). Dessa forma, o microrrelevo superficial do solo cria condições para favorecer o armazenamento e infiltração de água no solo (CASTRO et al., 2006), além de manter a maioria dos resíduos culturais na superfície do solo resultando em menores PS e PA, a depender da intensidade da precipitação e umidade antecedente do solo. Volk e Cogo (2004) observaram que a rugosidade superficial do solo, criada pela operação de escarificação, retarda o início do escoamento e aumenta a infiltração de água, reduzindo a PA por erosão.

Em SD, a EHP do solo é reduzida principalmente devido à dissipação da energia cinética das gotas das chuvas e a redução da velocidade e volume do escoamento superficial,

diminuindo a capacidade de desagregação e transporte pela chuva e pelo escoamento, devido aos resíduos culturais na superfície do solo (FOSTER, 1982). O preparo do solo é mínimo, realizado no momento da semeadura por meio dos instrumentos da semeadora (discos e hastes), mantendo praticamente todos os resíduos culturais na superfície do solo. Essa condição estimula o aumento de estoque do carbono orgânico no solo em comparação ao PC e ao CM, preponderantemente na camada superficial (BAYER et al., 2004). Apesar disso, ocorre aumento da densidade e diminuição da porosidade, especialmente dos macroporos, e da rugosidade na superfície do solo (BERTOL et al., 2001). Este sistema, conservacionista de solo em relação aos demais, pode ser combinado com uma operação de escarificação (PRAZERES et al., 2020), de modo a preservar parte dos resíduos na superfície, aumentando a porosidade interna e a rugosidade superficial, com reflexo positivo na infiltração de água no solo (KLEIN et al., 2014).

O fator práticas de conservação complementares (fator P da USLE/RUSLE) é complementar às básicas, elas são representadas pelo cultivo em contorno (subfator Pc), cultivo em faixas com rotação de culturas e em contorno (subfator Ps) e terraceamento (subfator Pt) (RENARD et al., 1997). Estas práticas modificam o fluxo e a direção do escoamento superficial, reduzindo a taxa de escoamento (RENARD; FOSTER, 1983).

2.4 EFEITOS DA MUDANÇA DE MANEJO NAS PROPRIEDADES DO SOLO PREVIAMENTE DEGRADADO

A recuperação de solos degradados pela EHP demanda tempo, custo e esforço. Na escala de vida humana o solo é considerado um recurso não renovável. A EHP ocorre de forma seletiva, num primeiro momento são perdidos os sedimentos mais finos, argila e matéria orgânica (BERTOL et al., 2007), ou seja, as frações mais reativas do solo e responsáveis pelo aporte de nutrientes, água e sais minerais às plantas (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Quando esta porção de constituintes é perdida, a restauração do solo se torna difícil e cara e, muitas vezes é praticamente irreversível num curto espaço de tempo.

A capacidade de um sistema natural em recuperar sua integridade estrutural e retornar ao seu estado natural ou similar ao anterior a degradação é conceituada como resiliência (DORAN, 1997; SEYBOLD et al, 1999). Determinar um tempo específico para o retorno do solo ao seu estado natural é praticamente impossível devido às variações que cada componente apresenta, demandando, por isso, um longo tempo de observação, pesquisa e coleta de dados para avaliar a dinâmica dessas variações temporais. A diminuição da EHP pode ser obtida por meio da aplicação de um conjunto de ações que reestabeleçam as

condições físicas, químicas e biológicas do solo a um nível equivalente ao de sua condição original (natural). Essa condição visa estabelecer o equilíbrio entre os componentes do solo que permitam a sustentabilidade do sistema como um todo (DIAS; GRIFFITH, 1998).

Os sistemas de cultivo possuem grande importância na recuperação de solos já fisicamente degradados. A recuperação destes solos pode ser buscada através da cobertura vegetal com espécies que tenham facilidade de estabelecimento, rápido crescimento, e que promovam adequada cobertura do solo. Neste processo, as plantas de cobertura desempenham um conjunto de ações integradas que propiciam benefícios aos sistemas de cultivo, com destaque para a redução da EHP. No entanto, as características morfológicas das plantas, como o tipo de raiz e de folha, o ângulo de disposição das folhas em relação ao colmo, a quantidade e espessura dos colmos e o hábito de crescimento das plantas (SILVA et al., 1986) influenciam na escolha das espécies quanto a sua eficiência em controlar os processos erosivos. A alternância de famílias botânicas na sucessão de ciclos de cultivo é desejável do ponto de vista de melhoramento das condições físicas e químicas do solo. As gramíneas possuem maior relação C/N e menor taxa de mineralização, além de possuírem maior volume e densidade do sistema radicular, em relação às leguminosas. Mediante estas diferenças, as leguminosas são mais importantes na melhoria das propriedades químicas do solo, enquanto as gramíneas interferem mais na parte física do solo.

Na região Sul do Brasil, a aveia (*Poaceae*) é cultivada no período de outono/inverno antecedendo culturas comerciais de verão em SD (GIACOMINI et al., 2004), principalmente o milho e a soja (SILVA et al., 2008). Entre as causas para a escolha do seu uso, destacam-se o alto rendimento de matéria seca, facilidade de aquisição de sementes, semeadura, rusticidade, adaptação às diversas condições de manejo, rapidez na formação de cobertura e decomposição lenta dos resíduos (SILVA et al., 2006), além de sua raiz fasciculada (FONTANELI et al., 2012), que melhora a agregação, e como consequência, a estrutura do solo, aumentando a sua porosidade e aeração, influenciando na dinâmica de água no solo (KLEIN, 2014).

Outra espécie muito comum, cultivada no período de outono/inverno na região Sul do Brasil, é a ervilhaca (*Vicia sativa*). Esta leguminosa destaca-se pelo aumento dos teores de N na camada superficial do solo (ALCÂNTARA et al., 2000) e contribui para recuperação dos estoques de C do solo (ANDRADE et al., 2012). Em função da capacidade dessa família botânica em fixar N atmosférico por associação com bactérias específicas (WERNER, 2005), antecedendo o cultivo de não leguminosas, como o milho, exigente quanto ao suprimento de N no solo.

Crucíferas como o nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), possuem um sistema radicular pivotante e profundo, com capacidade de reciclar nutrientes e crescer em camadas compactadas do solo, além de formarem bioporos estáveis, que melhoram os indicadores físicos do solo (PITOL; SALTON, 1993). Estas espécies também apresentam vantagens quando cultivadas em consórcio, por proporcionarem alta produção de biomassa vegetal (WOLSCHICK et al., 2018), maior persistência dos resíduos culturais na superfície do solo, além do fornecimento adequado de N ao solo (AITA; GIACOMINI, 2003), diminuindo a necessidade de investir recursos financeiros na adubação nitrogenada em cobertura no milho em sucessão (SILVA et al., 2006).

Uma das principais estratégias para redução das PS em solo previamente degradado pela EHP, é a conversão de manejos não conservacionistas para sistemas de manejo conservacionistas, como o sistema SD. A base de sustentação do sistema SD consiste, além da mobilização reduzida do solo, na rotação de culturas capazes de produzirem e manterem, por maior período, grande e diversificada quantidade de resíduos vegetais na superfície do solo (ANDRADE, 2009). Como consequência do mínimo revolvimento do solo, a SD preserva os agregados da fragmentação mecânica pelos implementos, mantém a cobertura do solo e consolida a camada superficial (BERTOL et al., 2004). Comparações entre parcelas de longo prazo e avaliações de campo, mostraram reduções expressivas das PS sob SD, em relação a outros tipos de preparo (COGO et al., 2003; GUADAGNIN et al., 2005; BERTOL et al., 2007). Lanza et al. (2013) observaram que o efeito residual do PC na EHP persistiu por até três anos, após a adoção da SD com plantas de cobertura no inverno, porém ocorreu uma redução progressiva das PS ao longo do tempo.

O tempo de recuperação do solo também pode variar de acordo com as diferentes classes de solo. Algumas classes apresentam limitações que as tornam suscetíveis à EHP, como é o caso dos Luvisolos, por exemplo. Normalmente, esses solos são pouco profundos, contém elevado teor de silte no horizonte A, o que implica em ausência de estrutura e em formação de crostas superficiais que potencializam o escoamento superficial (RIBEIRO et al., 2019). Os Vertissolos, apesar de quimicamente férteis, apresentam baixa permeabilidade e fraca aeração, sendo também caracterizados como suscetíveis à erosão. Outro exemplo é a classe dos Planossolos. Estes são solos imperfeitamente ou mal drenados, apresentam horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, normalmente arenosa ou média, que contrasta abruptamente com um horizonte B plânico subjacente, adensados, muito pouco permeáveis, portanto, são altamente suscetíveis a EHP.

Algumas classes de solos resultantes de intenso processo de intemperização, como os Nitossolos e Latossolos, apresentam excelentes atributos físicos em termos de porosidade,

permeabilidade, aeração, retenção e disponibilidade de água, sem restrições de drenagem, nem impedimentos ao desenvolvimento do sistema radicular, sendo considerados bastante resistentes à erosão. Supostamente, as evidências descritas anteriormente sugerem uma recuperação mais promissora e acelerada para estas classes de solo.

2.5 QUALIDADE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

Os principais indicadores utilizados para expressar a qualidade física do solo em ordem decrescente de importância são: infiltração de água no solo, macroporosidade, resistência à penetração de raízes, densidade do solo, porosidade total, e por fim, a microporosidade do solo (REICHERT et al., 2003). A infiltração se refere à passagem da água através da superfície do solo (LIBARDI, 1995), sendo o atributo mais importante para compreender as condições físicas internas do solo, bem como, a distribuição de tamanho e continuidade dos poros (REICHERT et al., 2003).

Este atributo é utilizado por diversos autores na comparação de sistemas de manejo do solo (REICHERT et al., 1992; SOBRINHO et al., 2003; ALVES et al., 2007; PANACHUKI et al., 2011; BERTOL et al., 2015). Os fatores que afetam este processo se relacionam com as características do solo, seu manejo, histórico de uso, cobertura vegetal, rugosidade, atividade biológica, declividade e forma da paisagem, entre outros (REICHERT et al., 1992). Esse processo hidrológico é importante no planejamento de estruturas hidráulicas para o gerenciamento do escoamento para controle da erosão hídrica (BERTOL et al., 2015).

O arranjo de partículas e o espaço poroso entre essas são divididos em macro e microporosidade. Klein & Libardi (2002), classificam os poros com diâmetro maior que 0,05 mm (que perdem a água em tensões menores que 6 kPa) em macroporos e, aqueles com diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm (que são esvaziados a tensões entre 6 e 1500 kPa) são classificados como microporos. Por isso, os macroporos são responsáveis pela aeração e pela maior contribuição na infiltração de água no solo e os microporos são os responsáveis pela retenção e armazenamento da água no solo (REINERT; REICHERT, 2006).

Lanzanova et al. (2013) afirmam que a taxa de infiltração de água no solo possui relação linear com a porcentagem de macroporos do solo. A formação de macroporos visando à melhoria estrutural do solo pode ser por meio biológico ou mecânico, mas a conservação dos macroporos é decorrente de um conjunto de operações do manejo aplicado sobre o solo (REINERT et al., 2006). Em relação à porosidade total, esta é menos influenciada do que a macro e a microporosidade pelo sistema de manejo, já que ela depende do efeito combinado

das duas. Portanto, é mais importante estudar o comportamento relativo da macro e microporosidade com a porosidade total do solo (BERTOL et al., 2000).

A D_s expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco pelo volume. Esta propriedade além de ser influenciada pela textura do solo, também é influenciada pelos sistemas de cultivo e de manejo, que alteram a estrutura e o espaço poroso a ela associados, interferindo na porosidade total, distribuição de poros por tamanho, capacidade de aeração, na quantidade de água disponível, permeabilidade e taxa de infiltração. É uma propriedade que permite avaliar o nível de adensamento ou compactação do solo. A densidade pode ser alterada pelo uso e manejo, na medida em que se altera a disposição das partículas do solo. O monitoramento da densidade do solo em razão do tempo poderá fornecer informações importantes a respeito da influência do uso e manejo na sustentabilidade da exploração a que o solo se encontra. Reinert e Reichert (1999) propuseram limites críticos de densidade do solo de $1,45 \text{ kg dm}^{-3}$ para solos com textura argilosa (550 g kg^{-1} de argila); $1,55 \text{ kg dm}^{-3}$, para os com textura média ($200\text{-}550 \text{ g kg}^{-1}$ de argila); e $1,65 \text{ kg dm}^{-3}$, para os com textura arenosa ($<200 \text{ g kg}^{-1}$ de argila).

A avaliação da estrutura do solo também ajuda a conhecer a qualidade física do solo. O índice utilizado para mensurar a estrutura pode ser o DMP dos agregados do solo (ALBUQUERQUE et al., 2005). A estabilidade de agregados em água é importante na manutenção do espaço poroso do solo, que influencia a aeração, a dinâmica da água, a temperatura do solo e o crescimento radicular. A estabilidade é avaliada pela distribuição dos agregados por tamanho, sendo realizada pelo peneiramento a seco e em água (SOUZA et al., 2019). Quanto maior o valor de DMP, maior será a resistência do mesmo à desagregação pelos agentes erosivos da EHP (ALBUQUERQUE et al., 2000), mantendo o solo menos sujeito à compactação e ao processo erosivo (RUSSEL, 1973). De acordo com Campos et al. (1995), o contínuo aporte de material orgânico é fonte de energia para a atividade microbiana, que atua como agente de estabilização dos agregados. Ademais, a matéria orgânica, por possuir complexa estrutura, com longas cadeias de carbono, agrega partículas minerais (DUFRANC et al., 2004), com influência direta na estabilização dos agregados (BRAIDA et al., 2010).

2.6 QUALIDADE DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO

A qualidade química do solo é avaliada por meio de suas propriedades químicas, as quais variam de acordo com o manejo, e se relacionam com a degradação ou recuperação do solo (ANDRADE et al., 2012). As propriedades químicas mais comuns para indicar a

qualidade química do solo são o pH, concentração de Al^{3+} , teores trocáveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ e P disponível e os micronutrientes (B, Mn e Zn) (ALVARENGA; DAVIDE, 1999). A matéria orgânica (MO) também é um dos indicadores mais sensíveis às transformações desencadeadas pelos sistemas de manejo do solo (BAYER; BERTOL, 1999). A adição de MO no solo contribui para o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) no solo (BAYER; MIELNICZUK, 1997), proporciona a formação de complexos estáveis com o Al, reduzindo sua toxidez (SALET, 1994) e contribuindo para uma maior disponibilidade de nutrientes no solo (TEIXEIRA et al., 1994; BURLE et al., 1997).

O pH é utilizado para determinar a acidez do solo e indicar a necessidade de calagem ou não (KAMINSKI, 1989). De forma indireta o pH indica a disponibilidade de nutrientes e a toxicidade de determinados elementos, especialmente o Al^{3+} (MELLONI et al., 2008). A maioria dos solos agrícolas brasileiros apresentam média a alta acidez (pH H_2O <5,5), limitando a produção das culturas (VELOSO et al., 1992). Os solos ácidos geralmente apresentam Al e Mn em níveis tóxicos, além de deficiências de Ca^{2+} , Mg^{2+} e P. O Al^{3+} em concentração elevada, além de ser tóxico às plantas, podem interferir na disponibilidade de outros nutrientes, principalmente na solubilidade de fosfato no solo, que tende a reagir com o Al^{3+} solúvel, formando fosfatos de Al.

O fósforo (P) é considerado um nutriente de baixa mobilidade no solo, comportamento atribuído a sua fixação pelos minerais de argila. Os teores de P disponível no solo são comumente baixos, podendo ser inferiores a $1,0 \text{ mg/dm}^3$ quando avaliados pelo extrator Melich 1 (GOEDERT et al., 1985). Um dos principais impactos causado pelo P, que, apesar de se encontrar em pequena quantidade na maioria dos solos brasileiros, é considerado o elemento-chave para ocorrência de eutrofização das águas superficiais (BERTOL et al., 2011).

Diversos autores (ROSOLEM et al 1998; WATANABE et al., 2005; MEDEIROS et al., 2008) observaram que as relações entre os principais cátions trocáveis no solo (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) podem estabelecer, um equilíbrio nutricional mais adequado ao desenvolvimento das plantas. As propriedades químicas próximas, como o raio iônico, valência, grau de hidratação e mobilidade, fazem com que haja competição pelos sítios de adsorção no solo, e na absorção pelas raízes, podendo prejudicar os processos de adsorção e absorção, um do outro (ORLANDO FILHO et al., 1996).

2.7 EFEITOS DA EROÇÃO HÍDRICA NO RENDIMENTO DE CULTURAS EM SOLO PREVIAMENTE DEGRADADO

O efeito da EHP no rendimento de culturas depende da espessura da camada do solo removida pela erosão, influenciado ainda pelos seguintes fatores: variação climática, principalmente distribuição de chuva e de temperatura durante a estação de crescimento da cultura; potencial genético da semente; tipo e quantidade de fertilizante aplicado (FENTON et al., 2005); e grau de incidência de pragas, moléstias e invasoras (GAERTNER et al., 2006). Esses fatores podem mascarar o efeito da erosão no rendimento das culturas (BAKKER et al., 2004), para mais ou para menos. Além disso, é preciso considerar que o efeito da redução de espessura do solo ocasionado pela erosão na produtividade é peculiar para cada cultura e para cada tipo de solo e de manejo (DEDECEK, 1992).

Diferentes tipos de solo e de manejo e diferentes culturas respondem distintamente à reposição da fertilidade perdida pela erosão (FRYE et al., 1985). Alguns autores (GAERTNER et al., 2003; GAERTNER et al., 2006; WANG et al., 2009) sugerem que a principal razão para a diminuição do rendimento de grãos de soja em função da redução da espessura do solo é a perda de MO. Seu conteúdo no solo apresenta correlação significativa com a erosão (GAERTNER et al., 2006; FENTON et al., 2005), sendo o constituinte mais facilmente removido por este processo (BERTOL et al., 2004). A perda de MO do solo concorre para degradar a estrutura (SALTON et al., 2008) e aumentar a compactação, diminuindo o armazenamento de água e nutrientes no solo, o que leva a necessidade adicional de fertilizante e aumento do custo de produção (HAMZA; ANDERSON, 2005). Elevada acidez, toxicidade por alumínio e baixa saturação por bases são problemáticas para as raízes das plantas em camadas inferiores do solo e prejudicam o desenvolvimento vegetal (SPAROVEK et al., 1991).

Avaliações comparando tratamentos com diferentes graus de erosão resultaram em estimativas confiáveis na resposta do rendimento das culturas (HONGHONG et al., 2019). Os valores dessas avaliações refletiram-se nas relações entre produtividade e erosão que foi avaliada sob chuva natural (DEDECEK, 1987). Em experimento com chuva natural, Gaertner et al. (2006) estimaram redução na produtividade de soja em $139 \text{ kg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ de solo perdido, em um Latossolo Vermelho distrófico. O teor de CO na camada de 10 a 20 cm foi o atributo químico que melhor se correlacionou com a produtividade destas culturas, em função das diferentes perdas de camadas de solo por erosão natural.

Em um Cambissolo Húmico alumínico, após 20 anos de ocorrência de erosão, sob chuva natural, a espessura dos horizontes nos tratamentos solo sem cultivo e sem cobertura (SC), preparo convencional (PC), cultivo mínimo (CM), rotação de preparos (RP) e

semeadura direta (SD) foi reduzida em 13,1; 0,99; 0,31; 0,18 e 0,13 cm, respectivamente (SCHICK, 2014). A redução de espessura da camada do solo se refletiu na produção de matéria seca e de grãos nos tratamentos PC, CM, RP e SD após 25 anos de ocorrência de erosão (WOLSCHICK, 2018).

Diversas pesquisas já avaliaram o efeito da erosão sobre o rendimento de culturas anuais e sobre os atributos químicos e físicos do solo, retirando camadas superficiais do solo para simular a erosão (FRYE et al, 1982; DEDECEK, 1987; SPAVOREK et al., 1991). Um problema desta abordagem é que os efeitos negativos da erosão sobre a produtividade podem ser superestimados, uma vez que a erosão natural ocorre gradualmente e seletivamente ao longo do tempo, e não resulta no desaparecimento total da superfície do solo como no caso dessas pesquisas (BAKKER et al., 2004).

Na região nordeste da China, Wang et al. (2009) simularam oito níveis de erosão por meio de raspagem mecânica da camada superficial do solo: camadas de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 cm foram retiradas, resultando em redução no rendimento de soja em 29%, 38%, 44%, 53%, 53%, 53%, e 64%, respectivamente, em condição de solo fertilizado. A redução de produtividade nesses níveis de raspagem foi 33%, 42%, 53%, 54%, 66%, 70% e 73%, respectivamente, quando o solo não foi fertilizado. Os resultados mostram que os fertilizantes minerais podem aumentar o rendimento das culturas em solo erodido, mas não pode recuperar o rendimento para o nível anterior a erosão.

Com o objetivo de avaliar o rendimento de grãos de soja em um Latossolo Vermelho do Cerrado, Dedecek (1987) observou queda de $72 \text{ kg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ de solo removido artificialmente. Em Argissolo Vermelho, a remoção de até 45 cm de solo reduziu o rendimento de grãos de milho, mesmo com a correção da acidez e adição de fertilizantes químicos. (SPAVOREK et al., 1991). Gaertner et al. (2003) removeram artificialmente 0, 3, 6 e 14 cm de um Latossolo Vermelho para prever o efeito da erosão hídrica nos rendimentos de trigo e soja. A redução foi 10 e $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ de solo removido, para trigo e soja, respectivamente.

É possível estimar a resposta do crescimento das culturas em relação à erosão, para qualquer tipo de solo e cultura, através de modelagem, porém o banco de dados é insuficiente para calibrar e validar esses modelos em uma ampla variedade de paisagens diferentes (BAKKER et al., 2004). Duan et al. (2011) modelaram o efeito da erosão no rendimento de culturas para solos do norte da China. Os resultados indicaram que a produtividade atual diminuirá em aproximadamente 1% para cada 1 cm de solo superficial perdido por erosão. Resultados obtidos por simulação indicaram que as principais causas de redução de rendimento são a diminuição da taxa de emergência e o aumento do estresse hídrico.

Diante do exposto, torna-se necessário conduzir pesquisas para obter valores que possam alimentar modelos matemáticos para estimar de forma eficaz e segura a relação de rendimento de culturas com a EHP.

3 HIPÓTESES

Os sistemas de manejo do solo estabelecidos como rotação de preparos (RP), cultivo mínimo (CM), preparo convencional (PC) e solo sem cultivo e descoberto (SC) foram convertidos 26 anos e meio após seu início, inserindo-se neles a SD, baseado nessas condições, as hipóteses foram formuladas com base no que segue:

- 3.1 As propriedades físicas (densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, e estabilidade de agregados) e químicas (pH em água, P, K, Ca, Mg e COT) do solo melhoram quando avaliadas entre o quarto e o sexto ano após a conversão de manejos, inserindo-se a SD (SD/SD, CM/SD, RP/SD, PC/SD e SC/SD), em relação ao primeiro e o terceiro ano de conversão.
- 3.2 Entre o quarto e o sexto ano após a conversão de diferentes sistemas de manejo para SD a produtividade de milho e a massa seca dos cultivos de inverno aumenta em relação ao primeiro e o terceiro ano de conversão à SD.
- 3.3 A EHP diminui após a conversão de manejo do solo com os tratamentos RP, CM e PC para a SD e principalmente do SC para a SD, em relação à testemunha (SD/SD) cujo efeito é maior nas perdas de solo do que nas perdas de água.

4 OBJETIVOS

4.1 GERAL

Avaliar as mudanças nas propriedades físicas e químicas de um Cambissolo Húmico, a ocorrência de erosão hídrica pluvial, e as alterações na produtividade de milho e a massa seca da parte aérea do milho e do cultivo consorciado de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro, entre o quarto e o sexto ano após a conversão de diferentes tipos de manejo do solo para a condição de semeadura direta.

4.2 ESPECÍFICOS

- 4.2.1 Ao final do terceiro ano de pesquisa, quantificar os valores de densidade, porosidade, estabilidade de agregados, pH em água, P, K, Ca, Mg e COT do solo, à conversão de diferentes tipos de manejo do solo para a condição de semeadura direta.
- 4.2.2 Determinar as perdas de solo e de água, anuais e totais, e as perdas de água após cada evento de chuva erosiva, à conversão de diferentes tipos de manejo do solo para a condição de semeadura direta.
- 4.2.3 Avaliar a produção de massa seca da parte aérea do cultivo consorciado de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro, bem como a produção de massa seca da parte aérea e de grãos do milho cultivado no verão.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO, DO CLIMA LOCAL E DO SOLO

A área experimental foi instalada em 1988, no Campus do Centro de Ciências Agroveterinárias de Lages (SC), Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UDESC), localizado entre 27° 49' S e 50° 20' W, a 923 m de altitude, na região do Planalto Sul Catarinense (Figura 1). O clima local é do tipo Cfb (subtropical/mesotérmico) segundo a classificação de Köeppen, com temperatura média anual de 15,7° C, precipitação média anual na região de 1.533 mm e erosividade anual de 5.033 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ (SCHICK et al., 2014a). O solo no local do experimento é um Cambissolo Húmico Alumínico léptico (SiBCS, 2018), de textura argilosa, com substrato composto de siltitos e argilitos, cuja descrição do perfil foi realizada por Guadagnin (2003). As principais características físicas e químicas obtidas pela descrição do perfil do solo na área experimental seguem na tabela 1. A erodibilidade do solo é 0,0175 Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ (SCHICK et al., 2014b). Esta pesquisa foi conduzida entre abril de 2018 e março de 2021.

Figura 1 - Localização do experimento no Campus da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC/Lages - SC.



Fonte: Google Maps, 2021.

Tabela 1 – Características e propriedades físicas e químicas do Cambissolo Húmico Aluminoso léptico de Lages (SC), referentes ao perfil no local do experimento.

| Característica/propriedade | Horizonte/Camada (cm) | | | | | |
|---|-----------------------|-------------|--------------|---------------|------------------|-----------|
| | Ap 0-20 | A2 20-34 | B/A 34-53 | B 53-75/82 | B/C 75/82-105 | C 105+ |
| Característica/propriedade física | | | | | | |
| Argila (%) | 40 | 40 | 42 | 46 | 52 | 32 |
| Silte (%) | 42 | 40 | 41 | 40 | 35 | 65 |
| Areia fina (%) | 11 | 10 | 10 | 9 | 8 | 2 |
| Areia Grossa (%) | 7 | 10 | 7 | 5 | 5 | 1 |
| Densidade partículas (g cm ⁻³) | 2,54 | 2,56 | 2,61 | 2,61 | 2,70 | 2,38 |
| Densidade solo (g cm ⁻³) | 1,30 | 1,35 | 1,33 | 1,28 | 1,27 | 1,19 |
| Microporos (cm ³ cm ⁻³) | 0,38 | 0,42 | 0,40 | 0,42 | 0,48 | - |
| Macroporos (cm ³ cm ⁻³) | 0,09 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | - |
| Taxa constante de infiltração (mm h ⁻¹) | 6,0 | - | - | - | - | - |
| Característica/propriedade química | | | | | | |
| C orgânico (%) | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | - |
| N mineral (mg dm ⁻³) | 5,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0 |
| P extraível (mg dm ⁻³) | 2,6 | 3,1 | 0,6 | 0,4 | 0,7 | 0,3 |
| K trocável (mg dm ⁻³) | 96,0 | 80,0 | 49,0 | 61,0 | 42,0 | 57,0 |
| Ca trocável (cmol _c dm ⁻³) | 2,63 | 3,05 | 0,68 | 0,45 | 0,72 | 0,29 |
| Mg trocável (cmol _c dm ⁻³) | 2,17 | 2,33 | 0,78 | 0,68 | 0,7 | 0,31 |
| Al trocável (cmol _c dm ⁻³) | 2,27 | 3,47 | 5,89 | 6,52 | 3,96 | 4,68 |
| pH H ₂ O (1:1) | 5,7 | 5,2 | 4,9 | 4,5 | 4,1 | 4,0 |

Fonte: Guadagnin (2003). **Perdas de nutrientes e carbono orgânico pela erosão hídrica, em um Cambissolo Húmico Aluminoso léptico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo.** Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2003. 150p. (Dissertação de Mestrado).

5.2 UNIDADE EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

A pesquisa foi conduzida em unidade experimental de 3,5 x 22,1 m (77,35 m²), em duas repetições por tratamento. Cada uma das parcelas era delimitada por chapas galvanizadas nas laterais e extremidade superior e por calhas coletoras do escoamento superficial na sua extremidade inferior, a qual estava conectada a um cano de PVC que conduzia a enxurrada até à caixa (tanque) de armazenagem para coleta das amostras situada dentro de uma trincheira localizada 6 m abaixo da parcela. Nessa trincheira havia um primeiro tanque com volume total de 750 L, com capacidade real para armazenar 500 L de enxurrada devido a existência de um divisor tipo “Geib” com nove janelas para passagem de 1/9 da enxurrada do primeiro para o segundo tanque de 500 L.

Os tratamentos consistiram na conversão de manejo do solo para a condição de semeadura direta foi realizada há seis anos, partindo-se dos seguintes manejos tradicionais que haviam sido conduzidos por vinte e seis anos e meio: semeadura direta sem preparo prévio do solo, com manejo anterior também sob semeadura direta sem preparo prévio, constituindo a testemunha (SD/SD); semeadura direta sem preparo prévio do solo, implantada

após rotação de preparos (RP/SD); semeadura direta sem preparo prévio do solo, implantada após cultivo mínimo (CM/SD); semeadura direta sem preparo prévio do solo, implantada após preparo convencional do solo com uma aração e duas gradagens (PC/SD) e semeadura direta sem preparo prévio do solo, implantada sob solo descoberto e sem cultivo (parcela padrão da USLE/RUSLE) (SC/SD).

No outono/inverno de cada ano, os tratamentos foram cultivados com um consórcio de espécies destinadas à cobertura do solo, utilizando aveia preta (*Avena strigosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e a ervilhaca comum (*Vicia sativa*), na densidade de semeadura respectivamente de 30, 10 e 40 kg ha⁻¹ (Figura 2). A semeadura era realizada de forma manual, a lanço, de modo a colocar as sementes na superfície do solo. Na primavera/verão de cada ano, o milho (*Zea mays*) era semeado com densidade de 60 mil sementes ha⁻¹, com auxílio de semeadora manual (saraquá, ou matraca), em linhas espaçadas 87,5 cm uma das outras, totalizando quatro linhas de milho na parcela, com distância de 20 cm entre as covas, (Figura 2). Na safra de 2018/2019 utilizou-se o híbrido 30F53VYHR Pioneer, semeado em 15 de outubro de 2018. Na safra 2019/2020, o híbrido VT PRO3 – Agroeste, semeado em 31 de outubro de 2019. Na safra 2020/2021, o híbrido XB 7116 Bt semeado 29 de outubro de 2020. A adubação foi realizada somente na cultura do milho, no momento da semeadura, de acordo com a necessidade da cultura (CQFS RS/SC, 2004). Aplicava-se P na forma de superfosfato triplo (41% P₂O₅) na dose de 350 kg ha⁻¹ e K na forma de cloreto de potássio (58% K₂O) na dose de 180 kg ha⁻¹. Ainda, N era aplicado na forma de ureia (46% N), em dois momentos, o primeiro na semeadura e o segundo na fase de quatro folhas expandidas (V4), na dose de 35 e 195 kg ha⁻¹, respectivamente. O controle de plantas invasoras era realizado manualmente ou quimicamente, dependendo da necessidade e do grau de infestação.

Figura 2 - Aveia preta (*Avena strigosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e ervilhaca comum (*Vicia sativa*) em consórcio, no período de outono/inverno (a); milho (*Zea mays*) solteiro, no período de primavera/verão (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

5.3 HISTÓRICO DE MANEJO E CULTIVO DO SOLO NA ÁREA EXPERIMENTAL

Até outubro de 1988, a área experimental era coberta por pastagens cultivadas (gramíneas e leguminosas consorciadas). A partir desta data, o solo foi sistematizado para a instalação do experimento, com duas arações e duas gradagens para a incorporação de 12 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico, com objetivo de elevar o pH do solo a 6,0 (Tabela 2).

Tabela 2 - Histórico contendo a descrição dos principais eventos, tipo de manejo e aplicação do corretivo calcário no experimento sobre o Cambissolo Húmico, por etapa entre os anos de 1988 e 2015, em Lages, SC.

| Ano | Descrição de eventos | Cultivo | Calcário aplicado (Mg ha ⁻¹) |
|------|--|---|---|
| 1988 | Novembro: instalação das parcelas com tratamentos SD; CM; PC e SC e início da coleta de dados. | RC | 12 Mg ha ⁻¹ |
| 1991 | Novembro: interrupção da coleta de dados em todos os tratamentos. | RC | — |
| 1992 | Outubro/1992: reinício da coleta de dados nos tratamentos SD; CM; PC e SC. | RC | 3,5 Mg ha ⁻¹ |
| 1998 | Outubro: instalação de duas parcelas adicionais (SD), totalizando quatro parcelas SD: duas iniciadas em 1992 e duas em 1998. | RC | — |
| 2007 | Outubro: duas parcelas SD, uma de 1992 outra de 1998, foram convertidas em rotação de preparo (RP). | RC | — |
| 2012 | Março: pesquisa com aplicação de dejetos líquidos de suíno (BANDEIRA, 2015). | RC | Dosagens específicas para cada parcela. |
| 2015 | Março: conversão dos manejos CM, RP, PC e SC em SD mantendo o SD original como SD (WOLSCHICK, 2018). | Cultivo consorciado de outono/inverno; milho solteiro no verão. | Dosagem recomendada para elevar o pH a 6,0. |
| 2021 | Entre abril de 2018 e março de 2021: continuidade de coleta de dados | Cultivo consorciado de outono/inverno; milho solteiro no verão. | — |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Nota: RC= Rotação de culturas com ervilhaca comum, milho, nabo forrageiro, feijão preto, aveia preta e soja.

As parcelas experimentais foram instaladas de acordo com a metodologia descrita em WISCHMEIER e SMITH (1978) e as caixas coletoras de enxurrada e, em novembro foi iniciada a coleta de dados para quantificar a erosão hídrica continuada ininterruptamente até outubro de 1991, com os seguintes tratamentos, em duas repetições: semeadura direta sem preparo prévio do solo (SD), cultivo mínimo com uma escarificação e uma gradagem (CM), preparo convencional com uma aração e duas gradagens (PC) e parcela padrão da USLE/RUSLE (SC). O cultivo do solo nos tratamentos SD, CM e PC foram realizados com a sucessão soja (verão) e trigo (inverno) em uma das repetições e, na outra com a rotação das culturas aveia, ervilhaca e trigo (inverno) antecedendo respectivamente a soja, milho e feijão (verão). Entre o período de novembro de 1991 e outubro de 1992 não foi realizado o cultivo do solo nos tratamentos SD, CM e PC e não houve preparo no SC, por isso não foram realizadas coletas e a erosão não foi determinada nesse período, no qual o solo permaneceu em pousio em todos os tratamentos. Em novembro de 1992 os tratamentos foram reinstalados nos mesmos locais, conforme descritos anteriormente, mantendo-se os cultivos com rotação e com sucessão de culturas. Antes da reinstalação dos tratamentos foi realizada calagem para elevar o pH do solo a 6,0, com 3,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico. No local do tratamento SC não se aplicou calcário nessa oportunidade. Assim, o solo foi preparado novamente no CM, PC e SC com as operações que haviam sido realizadas na instalação do experimento. Esse esquema experimental com quatro tratamentos, com rotação de culturas em uma repetição e com sucessão em outra, foi conduzido até o final de 1997. No início de 1998 instalou-se mais um tratamento com SD em duas repetições e o experimento passou, então, a ter quatro parcelas com SD, sendo duas já com seis anos de idade (1992 a 1997), e duas recém-instaladas. Foram mantidas as duas parcelas com CM, as duas com preparo convencional e as duas com SC, todas com sete anos de idade. A partir de 1998 as quatro parcelas em SD, as duas parcelas em CM e as duas em PC foram conduzidas sob o sistema de rotação com os cultivos de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro (inverno) antecedendo respectivamente a soja, milho e feijão (verão). Esse esquema experimental com quatro tratamentos cultivados (SD antiga, SD recente, CM e PC) mais um sem cultivo (SC), com rotação de culturas nas duas repetições, foram conduzidos até o final de 2006. Ao final desse período já se sabia, por meio de diversas avaliações, que nas duas parcelas mais recente da SD as condições físicas e químicas do solo haviam se igualado às duas mais antigas. No início de 2007, duas das quatro repetições da SD (uma antiga e outra recente) foram transformadas em rotação de preparos de solo (RP), criando-se, assim, um quarto tratamento distinto. A RP era realizada com a sequência de uma escarificação + uma gradagem num cultivo, uma aração + duas gradagens no cultivo seguinte e, no próximo cultivo realizava-se novamente a semeadura direta; na

sequência, a rotação dos referidos preparos era reiniciada. Portanto, a partir de 2007 os tratamentos que compunham o experimento eram SD, CM, RP, PC e SC, os quais foram assim conduzidos até o final de 2014.

Em março de 2012, antes da semeadura da cultura de inverno (ervilhaca), foi realizada uma aplicação de calcário no solo em todas as parcelas com cultivo, de forma a elevar o pH em água para 6,0. No tratamento testemunha (SC) não foi realizada a calagem. Nos tratamentos PC e CM o calcário foi incorporado (uma aração + duas gradagens no PC) e parcialmente incorporado (uma escarificação + uma gradagem no CM). Nos tratamentos RP e SD o calcário foi parcialmente incorporado com uma gradagem leve.

Entre outubro de 2012 e setembro de 2014 fez-se nova pesquisa com aplicação de dejetos líquidos de suínos, com duração de dois anos para a realização de um trabalho de dissertação de mestrado (BANDEIRA, 2015). Foram aplicados $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de dejetos em cada tratamento, em quatro vezes de $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ cada uma, durante o período de quatro cultivos, imediatamente após a plena germinação de cada ciclo de cultivo. Assim, até 2015 os tratamentos estudados consistiam em I – com cultivo do solo: SD, RP, CM e PC; e II – sem cultivo: SC (parcela padrão da USLE/RUSLE). Ao longo desse período foi mantida a rotação com as culturas de soja, milho e feijão no verão, e de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro no inverno, nos tratamentos SD, CM, RP e PC.

Em 2015, efetuou-se a correção de acidez do solo com aplicação de calcário dolomítico (PRNT 80%) para elevar o pH a 6,0 (CQFS RS/SC, 2004). Também, fez-se adubação para corrigir os teores de P com uso de superfosfato triplo (41% P_2O_5) e de K com cloreto de potássio (58% K_2O), de acordo com as recomendações de CQFS RS/SC (2004). Essa correção do solo foi realizada inclusive no tratamento SC. O calcário e os fertilizantes foram adicionados ao solo mediante a realização do preparo característico de cada tratamento até então conduzido (WOLSCHICK, 2018). Sobre essa condição, a partir de abril de 2015 foi implantada nova pesquisa no mesmo experimento, realizando-se a mudança de manejo nos tratamentos CM, RP, PC e SC, implantando-se neles a SD, passando os mesmos a denominar-se respectivamente CM/SD (Figura 3), RP/SD (Figura 4), PC/SD (Figura 5) e SC/SD (Figura 6). O tratamento SD original foi mantido com o mesmo manejo passando a denominar-se SD/SD (Figura 7), constituindo-se na testemunha da pesquisa a partir de então. Assim, os novos tratamentos passaram a diferir um dos outros pelo efeito residual do manejo do solo. O número de linhas de semeadura de milho passou de cinco para quatro após a conversão para SD. Nesta condição, até a presente pesquisa, foram cultivados no período de outono/inverno a Aveia preta (*Avena strigosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e ervilhaca comum (*Vicia sativa*) em consórcio e, no período de primavera/verão, o milho (*Zea mays*) solteiro.

Figura 3 - (a) Cultivo mínimo antes da conversão de manejo (CM); b) Cultivo mínimo, seis anos após a conversão de manejo com inserção da semeadura direta (CM/SD).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 4 - (a) Rotação de preparos antes da conversão de manejo (RP); b) Rotação de preparos, seis anos após a conversão de manejo com inserção da semeadura direta (RP/SD).



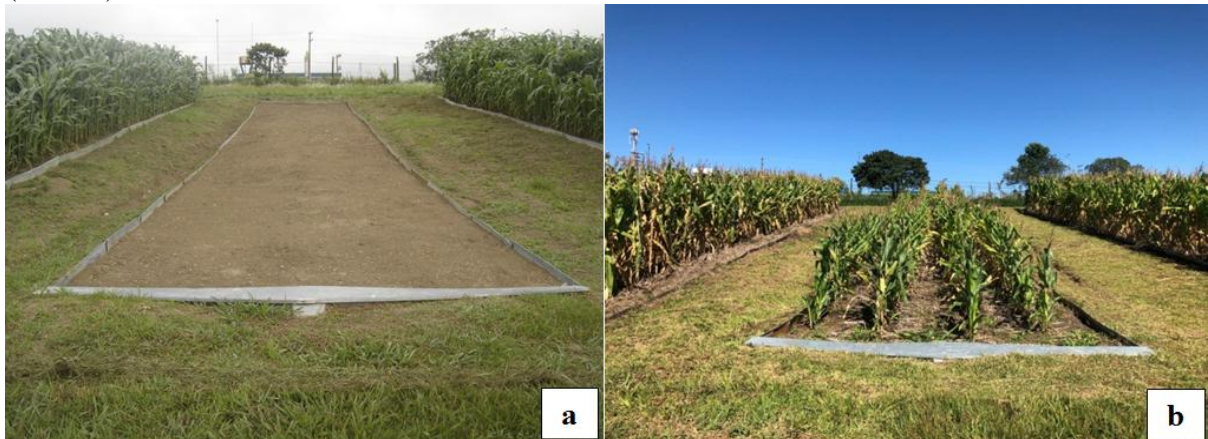
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5 - (a) Preparo convencional antes da conversão de manejo (PC); b) Preparo convencional, seis anos após a conversão de manejo com inserção da semeadura direta (PC/SD).



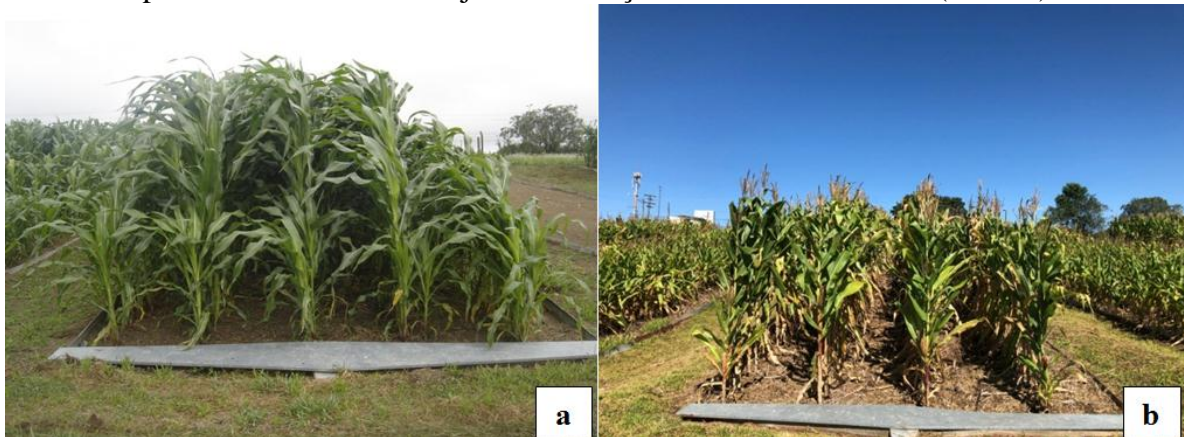
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 6 - (a) Solo sem cultivo e descoberto antes da conversão de manejo (SC); b) Solo sem cultivo e descoberto seis anos após a conversão de manejo com inserção da semeadura direta (SC/SD).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 7 - (a) Semeadura direta antes da conversão de manejo (SD); b) Semeadura direta, seis anos após a conversão de manejo com inserção da semeadura direta (SD/SD).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

5.4 QUANTIFICAÇÃO DA EROSÃO HÍDRICA

As coletas e as quantificações do escoamento superficial foram realizadas 112 vezes, entre abril de 2018 e março de 2021, considerando as chuvas erosivas, seguindo a metodologia descrita em Bertol et al. (2019). Chuva erosiva é aquela com volume igual ou maior que 10 mm, ou igual ou maior que 6 mm em um período igual ou inferior a 15 minutos, de acordo com definição de WISCHMEIER; SMITH (1958) modificada por Cabeda (1976). Um pluviômetro localizado na estação meteorológica do campus registrava as chuvas erosivas assim definidas. Após a ocorrência de cada evento de chuva erosiva era avaliada a erosão hídrica referente à chuva. Para isso, em campo se registrava a altura de enxurrada dentro das caixas com auxílio de régua graduada (Figura 8). O produto da altura de enxurrada dentro das caixas registrada na régua pela área das caixas resultava no volume de enxurrada contido nas caixas. Em seguida, a enxurrada contida nas caixas era agitada para promover a

homogeneização dos sedimentos na água. Nessa condição eram coletadas amostras em frascos de vidro de boca larga com capacidade de 300 cm³, em duas repetições por tanque. Os quais eram transportados ao laboratório e lá eram pesados. Com a finalidade de precipitar os sedimentos em suspensão na enxurrada adicionava-se de 3 a 5 gotas de ácido clorídrico (2,5 N) em cada frasco contendo a enxurrada. Assim que os sedimentos precipitavam, o que ocorria, em média, em 24 a 48 horas, o sobrenadante era retirado de dentro dos frascos por sifonamento, deixando-se uma lâmina de cerca de 1 cm de água sobre os sedimentos no fundo dos frascos. Os frascos eram assim levados à estufa com circulação de ar, a 55° C, até atingir massa constante, para realização da pesagem.

Figura 8 - Procedimento de leitura da altura da enxurrada no tanque de sedimentação, com auxílio da régua graduada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A partir das amostras de sedimentos secos nos frascos de vidro, calculou-se a massa de solo seco contido em suspensão nos tanques, relacionando com o volume do escoamento nos tanques. Estes valores, adicionados aos de massa de solo seco e volume de água contido nos sedimentos, permitiu obter as perdas totais de solo e água que ocorreram em cada chuva. O procedimento para a coleta e processamento das amostras de suspensão para o cálculo das perdas de solo e água seguiu a metodologia descrita em Bertol et al. (2019). Os dados observados de perda de solo foram ajustados para a declividade padrão da USLE (0,09 m m⁻¹), por meio do fator grau de declive (fator S da USLE), conforme proposto por WISCHMEIER; SMITH (1978).

No último ciclo de cultivo foram coletadas amostras de sedimentos erodidos que ficaram depositados nas calhas das parcelas e, ou, no fundo das caixas, as quais foram secas

em estufa com temperatura de 55 a 60°C e armazenadas em potes plásticos até o final do ciclo da cultura do milho, constituindo uma amostra única dos sedimentos, por parcela. Nestas amostras, foram determinados os teores extraíveis de P, K, Ca e Mg. As metodologias utilizadas para determinação do teor de P estão descritas em Murphy & Riley (1962), e para o teor de K, Ca e Mg estão descritas em Tedesco et al. (1995).

5.5 DETERMINAÇÕES FÍSICAS NO SOLO

As amostras com estrutura não deformada foram coletadas ao final da pesquisa (Janeiro/2021) em anéis volumétricos (70,69 e 141,37 cm³) nas camadas de 0 - 2,5; 2,5 - 5; 5 - 10; 10 - 20; e 20 - 40 cm, em dois pontos em cada parcela, um na parte superior e outro na parte inferior, para as determinações físicas. No laboratório a porosidade total (Pt) foi calculada pela diferença entre a massa de solo saturado e a massa de solo seco em volume conhecido. A microporosidade (Mi) foi determinada através de retenção de água obtida após a amostra ser saturada e submetida à tensão de 6 kPa em mesa de tensão de areia. O volume de macroporos (Ma) foi calculado pela diferença entre porosidade total e microporosidade. Para essas determinações seguiu-se o método descrito em EMBRAPA (2017). Posteriormente, os anéis volumétricos foram secos em estufa a 105°C, por pelo menos 24 h, para determinação da densidade do solo, calculada pelo quociente entre a massa do solo contida no anel e o volume do anel. Para exemplificar, seguem as equações abaixo:

$$D_s \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = \left[\frac{(m_{SS})}{V} \right] \quad (1)$$

$$Pt \text{ (\%)} = \left[\frac{(m_{\text{Saturado}} - m_{SS})}{V} \right] * 100 \quad (2)$$

$$Mi \text{ (\%)} = \left[\frac{(m_{S60 \text{ cm}} - m_{SS})}{V} \right] * 100 \quad (3)$$

$$Ma \text{ (\%)} = (Pt - \text{Micro}) * 100 \quad (4)$$

Onde:

- D_s = densidade do solo (g cm⁻³);
- m_{SS} = massa de solo seco à 105°C (g);
- V = volume interno do anel volumétrico (cm³);
- Pt = porosidade total (%);

- mSaturado = massa do solo saturado menos a massa do anel + tule + elástico (g).
- Mi = microporosidade do solo (%);
- mS60 cm = massa do solo a 60 cm de sucção menos a massa do anel + tule + elástico (g);
- Ma = macroporosidade do solo (%);

No momento da coleta de amostras de solo com estrutura não deformada foram coletadas amostras com estrutura deformada, nos mesmos locais e camadas de coleta dos anéis volumétricos. Nestas amostras determinou-se a estabilidade dos agregados em água utilizando o método padrão (KEMPER; CHEPIL, 1965). Para isso, as amostras foram separadas dos agregados maiores e dos torrões, em agregados menores, rompendo-os manualmente nos planos naturais de fraqueza do solo. Os agregados separados foram peneirados em um jogo de duas peneiras sobrepostas, com malhas de 8 e 4,75 mm. Assim, os agregados com diâmetro entre 8 e 4,75 mm foram usados para a determinação. Foram submetidos à oscilação vertical por 10 minutos, em um conjunto de quatro peneiras com abertura de malha de 4,75; 2; 1 e 0,25 mm. Os que resistiram à energia da água e ficaram retidos em cada peneira foram secos a 105°C e pesados, separadamente por malha, para o cálculo do diâmetro médio ponderado de agregados (DMP), de acordo com a equação a seguir:

$$\text{DMP (mm)} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{m_{\text{Agr}_i} - m_i}{T_{\text{Agr}_i} - m_{iT}} \right) * c_i$$

Onde:

- DMP: diâmetro médio ponderado (mm) ;
- mAgr_i = massa de agregados em cada classe (g);
- m_i = massa de material inerte em cada classe (g);
- TAg_r = massa de agregados da amostra inicial (g);
- m_{iT} = massa de material inerte total (de todas as classes) (g);
- c_i = diâmetro médio da classe de agregados (mm);

5.6 DETERMINAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO

As amostras com estrutura deformada foram coletadas ao final da pesquisa (mesmo momento das determinações físicas) nas camadas de 0 - 2,5; 2,5 - 5; 5 - 10; 10 - 20; e 20 - 40 cm, em dois pontos em cada parcela, um na parte superior e outro na parte inferior, para a determinação dos teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), carbono

orgânico total (COT) e pH em água. As amostras coletadas foram secas ao ar, moídas e passadas em peneira com malha de 2 mm (Terra Fina Seca ao Ar).

Foi determinado o pH em água, P extraível (leitura em espectrofotômetro de absorção molecular na região visível em 882 nm) (Mehlich 1) (MURPHY; RILEY, 1962), K, Ca e Mg trocáveis (leitura em espectrofotômetro de absorção atômica em chama). Essas análises foram realizadas segundo a metodologia descrita em Tedesco et al. (1995). O carbono orgânico total (COT) foi quantificado pelo método de combustão úmida, com oxidação dos compostos orgânicos por dicromato em composto ácido, com aplicação de calor externo (150°C por ~ 1 min) para completa oxidação dos compostos, conforme descrito em Tedesco et al. (1995). As determinações da taxa de enriquecimento em P, K, Ca e Mg foram realizadas pela razão do teor do elemento no sedimento pelo teor presente na camada superficial do solo.

5.7 AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO VEGETAL

A coleta da massa vegetal da parte aérea das plantas invernais (aveia preta, trigo e nabo forrageiro) foi realizada na época em que as plantas atingiram o pleno florescimento. A área de coleta foi delimitada por uma armação de 0,6 x 0,6 m (0,36 m²), efetuando-se o corte rente ao solo de todo o material vegetal, para quantificar a produção de massa seca da parte aérea (MSPA). Para isso, foi coletada a massa vegetal em dois pontos (superior e inferior) de cada parcela. Em seguida o material foi levado à estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 40°C até atingir peso constante para quantificação da massa seca.

Na cultura do milho foram coletadas aleatoriamente 5 plantas de duas fileiras centrais em cada parcela. As espigas foram separadas da parte aérea e debulhadas manualmente para determinação do rendimento de grãos. As plantas, a palha e o sabugo das espigas também foram contabilizados com o mesmo procedimento.

5.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento experimental utilizado neste trabalho foi o inteiramente casualizado, com duas repetições por tratamento. Realizou-se a análise descritiva dos dados de PS e PA. Para a produtividade das culturas, os dados foram analisados utilizando o programa SISVAR para análise de variância e, quando houve diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico da tese foi tratado em duas seções. Na seção 1 foram apresentados e discutidos os resultados referentes aos ciclos de cultivo entre os anos 2018 e 2021. Na seção 2 foi construída uma linha do tempo, na qual os resultados foram confrontados com aqueles da pesquisa anterior conduzida no mesmo experimento, entre 2015 e início de 2018. Assim, ao final de seis anos de cultivo (12 ciclos de cultivo) pôde-se analisar o grau de evolução das características do solo e de produtividade das culturas e a involução da EHP, nos distintos manejos do solo que, foram convertidos para a condição de SD.

6.1 SEÇÃO 1

6.1.1 Caracterização química e física do solo e dos sedimentos da erosão

6.1.1.1 Fósforo, potássio, cálcio, magnésio e pH do solo

A camada superficial do solo (0 – 2,5 cm) apresentou teor de P (Tabela 3) alto (12,1 - 24,0 mg dm⁻³) em todos os tratamentos, com exceção do PC/SD, considerado médio. Na camada de 2,5 – 5 cm os teores de P são médios para SD/SD, RP/SD e CM/SD, e baixos para PC/SD e SC/SD, respectivamente. Nas demais camadas, os teores são baixos (< 8,0 mg dm⁻³), para todos os tratamentos (CQFS, 2016).

A similaridade de uso e manejo do solo em todos os tratamentos, a adição de fertilizantes sem incorporá-los e, a baixa mobilidade do elemento P no perfil do solo, explicam o teor muito alto deste elemento na camada superficial do solo (0 – 2,5 cm). Esta combinação de fatores condiciona o aumento no teor deste e outros elementos nos sedimentos perdidos por escoamento superficial (POTE et al., 1996; GUADAGNIN, 2003). Teores elevados de P na camada superficial do solo foram observados por diversos autores (ELTZ et al., 1989; SCHICK et al., 2000; ANDRADE et al., 2012), corroborando com os resultados desta pesquisa.

Os teores de K (Tabela 3) até a camada de 5 cm foram considerados muito altos para todos os tratamentos (CQFS, 2016), exceto para o tratamento SC/SD. Os tratamentos RP/SD e CM/SD foram superiores à testemunha (SD/SD), em todas as camadas do solo. O K é um elemento que apresenta alta mobilidade no tecido vegetal, por isso, plantas de cobertura podem constituir uma fonte expressiva do nutriente para culturas em SD.

Tabela 3 – Teores de P extraível, K, Ca e Mg trocáveis e valores de pH (H₂O) no solo, em diferentes tratamentos e camadas, em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).

| | SD/SD | RP/SD | CM/SD | PC/SD | SC/SD |
|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| cm | P (mg dm ⁻³) | | | | |
| 0-2,5 | 22,7 | 19,7 | 18,5 | 11,8 | 18,7 |
| 2,5-5 | 10,1 | 9,7 | 8,6 | 6,0 | 5,1 |
| 5-10 | 5,1 | 4,8 | 5,6 | 2,5 | 2,6 |
| 10-20 | 1,6 | 1,6 | 2,6 | 2,1 | 1,6 |
| 20-40 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 1,1 | 0,8 |
| | K (mg dm ⁻³) | | | | |
| 0-2,5 | 226 | 318 | 305 | 239 | 222 |
| 2,5-5 | 218 | 332 | 291 | 225 | 139 |
| 5-10 | 165 | 343 | 220 | 137 | 85 |
| 10-20 | 81 | 89 | 115 | 64 | 42 |
| 20-40 | 43 | 50 | 65 | 43 | 32 |
| | Ca (cmol _c dm ⁻³) | | | | |
| 0-2,5 | 8,9 | 7,7 | 7,4 | 5,2 | 5,6 |
| 2,5-5 | 7,7 | 6,0 | 7,4 | 5,3 | 4,8 |
| 5-10 | 5,0 | 5,4 | 6,3 | 4,7 | 4,5 |
| 10-20 | 4,1 | 4,8 | 4,1 | 3,4 | 3,1 |
| 20-40 | 3,1 | 3,1 | 2,7 | 3,0 | 1,6 |
| | Mg (cmol _c dm ⁻³) | | | | |
| 0-2,5 | 15,7 | 19,7 | 19,0 | 14,5 | 13,9 |
| 2,5-5 | 14,7 | 19,6 | 18,2 | 13,9 | 9,4 |
| 5-10 | 10,7 | 19,8 | 14,1 | 9,2 | 6,5 |
| 10-20 | 6,1 | 6,8 | 7,8 | 4,9 | 3,7 |
| 20-40 | 3,7 | 4,0 | 4,6 | 3,6 | 2,4 |
| | pH H ₂ O (1:1) | | | | |
| 0-2,5 | 5,9 | 5,5 | 5,6 | 5,4 | 5,7 |
| 2,5-5 | 6,0 | 5,6 | 5,8 | 5,5 | 5,9 |
| 5-10 | 6,0 | 5,5 | 5,7 | 5,7 | 5,8 |
| 10-20 | 5,7 | 5,6 | 5,4 | 5,6 | 5,7 |
| 20-40 | 5,3 | 5,4 | 5,2 | 5,3 | 5,1 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O K disponibilizado pela palhada, assim como aquele adicionado via adubação potássica (KCl) pode ser intensamente lixiviado no perfil do solo, dependendo da quantidade de chuva, da dose de fertilizante aplicado e da textura do solo, podendo proporcionar aumentos na concentração do elemento no solo (ROSOLEM et al., 2006). Os teores de Ca e Mg (Tabela 3) apresentaram maior teor dentro da camada de 0 – 10 cm em todos os tratamentos, considerados altos (> 4,0 cmol_c dm⁻³ para Ca e >1,0 cmol_c dm⁻³ para Mg) (CQFS, 2016). O pH do solo apresentou baixa variação entre tratamentos, com valores absolutos entre 5,1 a 6,0. Esses valores são considerados médios, visto que a correção do pH foi realizada na época da conversão de diferentes sistemas de manejo do solo para SD.

6.1.1.2 Fósforo, potássio, cálcio e magnésio nos sedimentos perdidos por erosão hídrica pluvial

Os teores de P (Tabela 4) nos sedimentos do escoamento superficial foram 4,7 vezes maiores nos tratamentos com histórico de manejo conservacionista (SD/SD, RP/SD e CM/SD), do que naqueles historicamente convencionais (PC/SD e SC/SD). Esse comportamento é explicado pelo maior teor desse elemento na camada superficial do solo (Tabela 3).

Schick et al. (2000) observaram teores de P superiores nos sedimentos perdidos por EHP na mesma área experimental, com valor médio de 105 mg dm^{-3} para SD na média de 11 cultivos. Valores de concentrações semelhantes a estas foram encontradas por Bertol et al. (2004), para o mesmo tipo de solo sob tratamentos conduzidos por seis e nove anos sob semeadura direta.

Tabela 4 - Teores de P extraível, K, Ca, e Mg trocável nos sedimentos perdidos por erosão, em diferentes tratamentos, em um Cambissolo Húmico (média de duas repetições).

| SD/SD | RP/SD | CM/SD | PC/SD | SC/SD |
|--|-------|-------|-------|-------|
| P (mg dm^{-3}) | | | | |
| 14,2 | 15,6 | 20,4 | 15,8 | 5,5 |
| K (mg dm^{-3}) | | | | |
| 269 | 219 | 239 | 292 | 198 |
| Ca ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) | | | | |
| 7,5 | 7,9 | 7,3 | 6,3 | 5,4 |
| Mg ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) | | | | |
| 7,8 | 7,1 | 6,9 | 5,8 | 5,8 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os teores de K, Ca e Mg trocáveis (Tabela 4) foram 2,3, 1,3 e 1,2 vezes maiores nos tratamentos com histórico de manejo conservacionista (SD/SD, RP/SD e CM/SD), do que naqueles historicamente convencionais (PC/SD e SC/SD), e também seguem o mesmo comportamento do P extraível, com alto teor na camada superficial do solo. Os sedimentos perdidos por erosão nos preparos conservacionistas provavelmente foram coloidais na sua maioria e, portanto, com maior capacidade de adsorção de elementos químicos do que nos convencionais, provavelmente não coloidais (BERTOL et al., 2004).

6.1.1.3 Taxa de enriquecimento em fósforo, potássio, cálcio e magnésio

As taxas de enriquecimento em fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), determinadas em amostras de sedimentos da enxurrada coletados no último ciclo de cultivo estão apresentados na tabela 5. As maiores taxas de enriquecimento em P, K e Ca ocorreram no tratamento PC/SD. Para o Mg não houve enriquecimento por parte dos sedimentos erodidos, mesmo comportamento observado nos dados apresentados por Schick et al. (2000). O elevado teor desses elementos na camada superficial do solo (0 – 2,5) contribuiu para aumentar seu transporte através dos sedimentos durante o escoamento superficial.

Tabela 5 - Taxa de enriquecimento em P extraível, K, Ca e Mg trocável, em diferentes tratamentos, em um Cambissolo Húmico (média de duas repetições).

| Tratamento | P | K | Ca | Mg |
|------------|---------------------------------|-----|--|-----|
| | mg dm ⁻³ | | cmol _c dm ⁻³ | |
| SD/SD | 0,6 | 1,2 | 0,8 | 0,5 |
| RP/SD | 0,8 | 0,7 | 1,0 | 0,4 |
| CM/SD | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 0,4 |
| PC/SD | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 0,4 |
| SC/SD | 0,3 | 0,9 | 1,0 | 0,4 |
| Média | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 0,4 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

6.1.1.4 Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total

A densidade do solo (Ds) variou entre 0,9 e 1,5 g cm⁻³ (Tabela 6). A baixa Ds observada na camada superficial do solo (0- 2,5 cm) em todos os tratamentos pode estar relacionada ao mesmo sistema de manejo (SD) conduzido em igualdade em todos os tratamentos, além da ausência do tráfego de máquinas na área experimental. Nas camadas inferiores os valores de Ds aumentaram igualmente em todos os tratamentos. Os valores de Ds observados encontram-se abaixo do limite crítico de densidade estabelecido por Reichert et al. (2003), que consideram a densidade crítica de 1,55 g cm⁻³ para solos de textura média (20 a 55% de argila), caso do Cambissolo Húmico da área experimental com 40% de argila (GUADAGNIN, 2003).

O solo ideal deve apresentar volume e dimensões adequadas de poros para a entrada, movimentação e retenção de água e ar para atender às necessidades das culturas (HILLEL, 1980). Kiehl (1979) classificou o solo “ideal” como aquele com a proporção de 50% de

porosidade total (1/3 macroporos e 2/3 microporos) e 50% de volumes sólidos (45% materiais minerais e 5% matéria orgânica). Considerando a camada 0 - 40 cm, os valores de Pt (Tabela 6) variaram de 44 a 63% em todos os tratamentos. Estes são similares aos encontrados por Bertol et al. (2000) na mesma área experimental, variando de 51 a 57% em SD. Ademais, os valores de Pt se situam em condições ideais para o desenvolvimento vegetal.

Tabela 6 - Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Ma), microporos (Mi) em diferentes tratamentos, em um Cambissolo Húmico (média de duas repetições).

| Camada | Tratamentos | | | | |
|--------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | SD/SD | RP/SD | CM/SD | PC/SD | SC/SD |
| | Ds (g cm ⁻³) | | | | |
| 0-2,5 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,2 |
| 2,5-5 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,3 |
| 5-10 | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | 1,4 |
| 10-20 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,5 |
| 20-40 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 1,3 |
| | Pt (%) | | | | |
| 0-2,5 | 63 | 63 | 57 | 51 | 49 |
| 2,5-5 | 56 | 54 | 53 | 55 | 48 |
| 5-10 | 52 | 55 | 54 | 55 | 47 |
| 10-20 | 57 | 55 | 53 | 52 | 44 |
| 20-40 | 50 | 58 | 49 | 53 | 49 |
| | Ma (%) | | | | |
| 0-2,5 | 15 | 16 | 13 | 14 | 9 |
| 2,5-5 | 14 | 15 | 13 | 11 | 6 |
| 5-10 | 7 | 16 | 14 | 13 | 8 |
| 10-20 | 8 | 12 | 11 | 9 | 5 |
| 20-40 | 7 | 8 | 7 | 6 | 3 |
| | Mi (%) | | | | |
| 0-2,5 | 48 | 47 | 44 | 41 | 44 |
| 2,5-5 | 42 | 39 | 41 | 44 | 43 |
| 5-10 | 45 | 39 | 40 | 43 | 40 |
| 10-20 | 48 | 43 | 42 | 44 | 39 |
| 20-40 | 43 | 49 | 42 | 47 | 46 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Em relação aos macroporos (Tabela 6) com exceção do tratamento SC/SD, os demais apresentaram valores considerados não restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas até a camada de 2,5 - 5 cm para SD/SD e para RP/SD e CM/SD até a camada de 10 - 20 cm, considerando o limite crítico de 10%, onde valores abaixo deste sugerem problemas de aeração às raízes das plantas (XU et al., 1992). Os tratamentos RP/SD

e CM/SD historicamente apresentam alguma mobilização do solo nas camadas inferiores, isso pode ter favorecido a manutenção dos macroporos até a camada de 20 cm.

6.1.1.5 Carbono orgânico total e diâmetro médio ponderado de agregados do solo

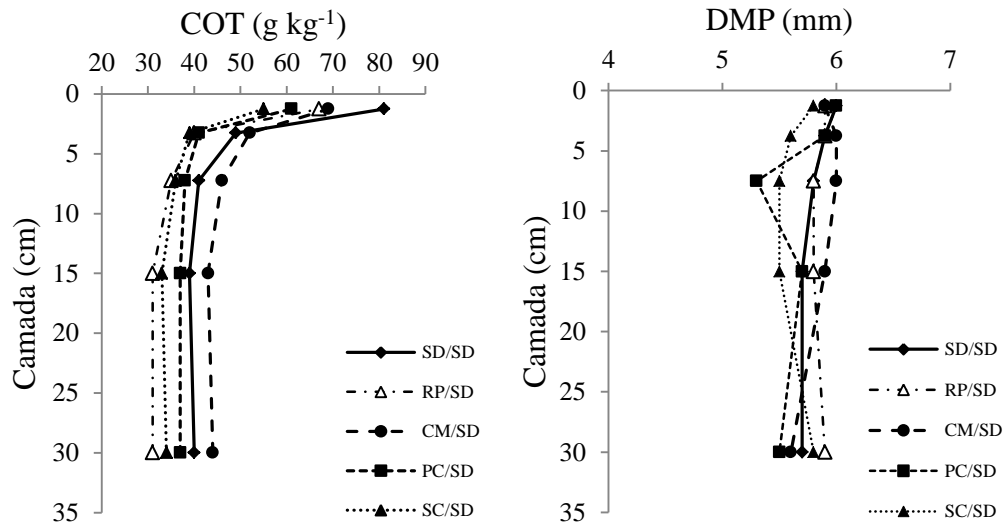
Em todos os tratamentos ocorreu uma estratificação em profundidade no teor de COT (Figura 9a). Na camada superficial do solo (0 – 2,5 cm), o tratamento testemunha (SD/SD) apresentou 17; 15; 25 e 32% a mais de COT, em relação aos tratamentos RP/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD, respectivamente. Essas proporções também foram observadas por Wolschick (2018) na mesma área experimental, três anos antes desta pesquisa.

Os teores mais elevados de COT nos tratamentos considerados mais conservacionistas (SD/SD; RP/SD e CM/SD) já eram esperados. Em relação aos tratamentos PC/SD e SC/SD, a ausência de preparo do solo resultou na permanência de resíduos culturais na superfície do solo, aliado à aplicação de fertilizantes na superfície sem incorporação, proporcionaram condições para o acúmulo de COT na camada superficial. A redução ou eliminação do revolvimento do solo se constitui pré-requisito para o aumento no conteúdo de COT, nas condições de clima subtropical do sul do Brasil (BAYER; MIELNICZUK, 1997).

Este aumento localizado de matéria orgânica na superfície do solo em SD é muito importante nos processos que ocorrem no solo, como aumento da disponibilidade de água, redução da amplitude térmica, alteração na dinâmica de nutrientes e de elementos tóxicos no solo (REICOSKY et al., 1995), além da mitigação das emissões de gases na agricultura (IPCC, 2007). A fixação do C no solo tem sido valorizada como alternativa para compensar a crescente emissão de dióxido de carbono (CO₂) que é um dos gases causadores do efeito estufa no planeta.

Os valores de DMP variaram entre 5,3 a 6,1 (Figura 9b). São valores considerados altos em relação aos solos em geral e, indicam alta estabilidade de agregados (ANDRADE et al., 2010). O incremento no teor de COT, sobretudo nas camadas superiores melhorou o estado de agregação do solo, independentemente do efeito residual, proporcionado pelos diferentes manejos antes da conversão para SD. Valores de DMP similares as estes foram encontrados na mesma área experimental por Bertol et al. (2001), com variação de 5,6 a 5,9 e Wolschick (2018), com variação de 5,3 a 6,1. Souza et al. (2017), em área adjacente, encontraram valores entre 5,6 e 5,7 em tratamentos que consistiam de diferentes doses de adubo aplicados na superfície do solo em condições de SD.

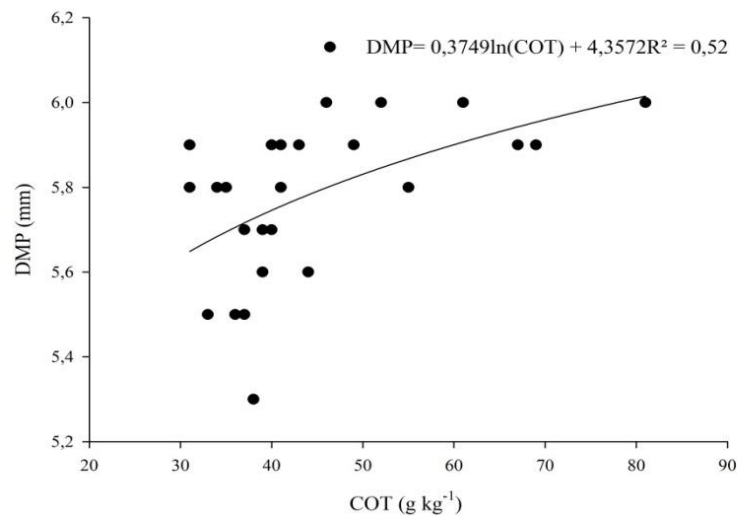
Figura 9 - Teores de carbono orgânico total (COT) (a) e diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) (b) do solo em diferentes tratamentos, em diferentes camadas, em um Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A relação entre os teores de COT e a agregação do solo pelo DMP, é apresentada na Figura 10. A conversão de sistemas de manejo do solo para SD proporcionou aumentos nos teores de COT, com efeito positivo na agregação do solo. Assim, o modelo descrito ajustou-se satisfatoriamente aos dados de COT do solo, e explicou o DMP em um nível de 52%, do incremento de COT entre o quarto e sexto ano de conversão de diferentes sistemas de manejo do solo para SD.

Figura 10 - Relação entre diâmetro médio ponderado de agregados do solo (DMP) e o carbono orgânico total (COT), obtidos em amostras coletadas ao final da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O alto DMP, ou a presença de agregados grandes, pode refletir a resistência do solo à EHP, isso acontece porque quanto maior for o agregado, maiores serão o DMP e os espaços porosos entre agregados, aumentando a infiltração e diminuindo as PS e PA (BERTOL et al., 2004). A matéria orgânica é um agente responsável pela estabilização dos agregados, sendo comum encontrar correlação positiva entre essas duas variáveis (CASTRO FILHO et al., 1998).

6.1.2 Produção vegetal

6.1.2.1 Massa seca da parte aérea

A massa seca da parte aérea (MSPA) do cultivo consorciado de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro no período de outono/inverno apresentou diferentes valores entre tratamentos. De modo geral os valores de MSPA oscilaram entre 1340 e 5639 kg ha⁻¹ nos três cultivos consecutivos (Tabela 7).

No ano 2018, o valor de MSPA observado no tratamento RP/SD foi superior aos demais, com uma produtividade de 5639 kg ha⁻¹, ou seja, 1445 kg ha⁻¹ a mais que a testemunha (SD/SD). A diferença entre SC/SD e a testemunha (SD/SD) foi de 444 kg ha⁻¹, a menor diferença observada nos três anos entre os tratamentos mais contrastantes. Em 2019, a produtividade de MSPA seguiu a mesma tendência observada no ano anterior, com os tratamentos RP/SD; CM/SD e testemunha (SD/SD) obtendo valores de MSPA acima de 5000 kg ha⁻¹, com o tratamento RP/SD alcançando 5309 kg ha⁻¹. No terceiro ano (2020), a MSPA no tratamento CM/SD foi numericamente superior aos demais, com 5264 kg ha⁻¹ de produtividade. Com a maior diferença encontrada em três anos, o tratamento SC/SD foi inferior ($p < 0,05$) aos demais, com a maior diferença observada em três anos, em relação à SD/SD.

A produção de MSPA de milho seguiu a mesma tendência observada para o cultivo consorciado de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro no outono/inverno, não havendo diferenças estatísticas no ciclo de cultivo de 2018/2019, com elevados valores para o tipo de híbrido utilizado (duplo propósito para ensilagem e grãos). O ciclo de cultivo 2019/2020 apresentou diferença estatística entre SD/SD e os tratamentos PC/SD e SC/SD, com diferença 3480 e 2280 kg ha⁻¹ respectivamente. No ciclo de cultivo de 2020/2021 a MSPA de milho apenas o tratamento SC/SD diferiu dos demais, em virtude do desenvolvimento inicial prejudicado pela estiagem no momento da semeadura.

Tabela 7 - Massa seca da parte aérea produzida pelo cultivo consorciado de ervilhaca, nabo forrageiro e aveia preta, em cada tratamento para os ciclos de cultivo de 2018, 2019 e 2020 e milho para os ciclos de cultivo 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021.

| Ciclo de cultivo | Tratamento | | | | |
|------------------|------------------------------------|---------|---------|--------|---------|
| | SD/SD | RP/SD | CM/SD | PC/SD | SC/SD |
| | MSPA (kg ha ⁻¹) | | | | |
| | Aveia, ervilhaca e nabo forrageiro | | | | |
| 2018 | 4194 A | 5639 A | 4500 A | 4444 A | 3750 A |
| 2019 | 5096 A | 5309 A | 5230 A | 4835 A | 2233 A |
| 2020 | 4521 A | 3757 A | 5264 A | 3521 A | 1340 B |
| Média | 4604 | 4902 | 4998 | 4267 | 2441 |
| | Milho | | | | |
| 2018/2019 | 17340 A | 17490 A | 17812 A | 9750 A | 11910 A |
| 2019/2020 | 10920 A | 10680 A | 8880 AB | 8640 B | 7440 B |
| 2020/2021 | 16730 A | 15030 A | 16482 A | 8520 A | 4896 B |
| Média | 14996 | 14400 | 14391 | 8970 | 8082 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo. Médias seguidas pela mesma letra na coluna em cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

6.1.2.2 Produtividade de grãos do milho

Os valores de produtividade de grãos (PG) e massa de mil grãos (MMG) de milho estão descritos na Tabela 8. A PG e MMG apresentaram o mesmo comportamento observado para MSPA, com pequena variação entre tratamentos. Nos três ciclos de cultivos consecutivos, o tratamento SD/SD (testemunha) apresentou os maiores valores de médias de PG e MMG. Isso pode ser justificado devido ao fato deste tratamento ter um histórico conservacionista que reduziu a EHP e manteve a capacidade produtiva do solo ao longo do tempo. Com o mesmo manejo do solo (SD) empregado igualmente em todos os tratamentos, a diferença média de PG (Tabela 8) entre eles, é reflexo do efeito residual causado no solo pelos manejos anteriores a esta pesquisa. Na mesma área experimental, Schick (2014) obteve 6930 kg ha⁻¹ de grãos de milho em SD, 8031 kg ha⁻¹ em CM e 5857 kg ha⁻¹ em PC, na média, em seis ciclos de cultivos.

No ciclo de cultivo de 2018/2019 a PG não alcançou a produtividade esperada para o híbrido 30F53VYHR Pioneer em nenhum dos tratamentos, ficando abaixo do esperado (< 8500 kg ha⁻¹). O ciclo de cultivo 2019/2020 seguiu a mesma proporção de rendimentos do ciclo de cultivo anterior, porém com valores mais elevados para todos os tratamentos, incluindo o SC/SD, que não diferiu em PG dos demais. No ciclo de cultivo 2020/2021

ocorreu um período de estiagem até o início da germinação das sementes, o que pode ter dificultado o desenvolvimento inicial do milho nas parcelas com histórico de preparo convencional, aumentando a amplitude entre os tratamentos mais contrastantes. A PG do híbrido XB 7116, semeado neste ciclo de cultivo diferiu estatisticamente entre SD/SD e SC/SD, com diferença de 7492 kg ha⁻¹, demonstrando a inviabilidade do cultivo de milho neste tratamento, mesmo a após conversão de solo descoberto e sem cultivo para SD.

Tabela 8 - Produtividades de grãos (PG) e massa de mil grãos (MMG) de milho em cada tratamento, para o ciclo de cultivos 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021 (média das repetições).

| Ciclo de cultivo | Tratamento | | | | |
|------------------|---------------------------|---------|---------|---------|--------|
| | SD/SD | RP/SD | CM/SD | PC/SD | SC/SD |
| | PG (kg ha ⁻¹) | | | | |
| 2018/2019 | 5940 A | 5694 A | 4770 A | 4122 A | 2316 A |
| 2019/2020 | 7980 A | 6911 A | 6645 A | 5482 A | 5799 A |
| 2020/2021 | 9621 A | 8429 AB | 7429 AB | 4008 AB | 2129 B |
| Média | 7847 | 7011 | 6281 | 4537 | 3415 |
| | MMG (g) | | | | |
| 2018/2019 | 199 A | 203 A | 211 A | 191 A | 140 A |
| 2019/2020 | 297 A | 273 A | 282 A | 241 A | 277 A |
| 2020/2021 | 354 A | 309 AB | 297 AB | 237 AB | 199 B |
| Média | 283 | 262 | 263 | 223 | 205 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo. Médias seguidas pela mesma letra na coluna em cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Em relação aos componentes de rendimento do milho (Tabela 9), no ciclo de cultivo correspondente a 2018/2019, a variável altura de plantas e altura das espigas apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos com histórico conservacionista (SD/SD; RP/SD e CM/SD) e com histórico de manejo convencional (PC/SD e SC/SD). O tratamento SD/SD foi superior em todos os anos para altura de plantas, mas em relação à altura de inserção de espiga foi superior apenas no ciclo de cultivo 2020/2021. Diâmetro de colmo e comprimento de espiga não diferiu de maneira significativa entre tratamentos e, diâmetro de espiga, fileiras por espiga e grãos por fileira foram inferiores apenas em SC/SD.

O ciclo 2019/2020 segue a mesma tendência do ano anterior, mas com destaque para o tratamento PC/SD, que difere significativamente de SC/SD na variável altura de planta e altura da espiga, se igualando em outras variáveis, como em diâmetro de colmo e comprimento de espiga nos tratamentos mais conservacionistas, com histórico de CM/SD. No ciclo 2020/2021, a média geral dos componentes do rendimento do milho foi inferior às

médias dos anos anteriores. Como justificado anteriormente, o período de estiagem até o início da germinação das sementes, pode ter prejudicado estas variáveis.

Tabela 9 - Altura de planta, altura de inserção da espiga, diâmetro de colmo, comprimento de espiga, diâmetro de espiga, número de fileiras por espiga e número de grãos por fileira, em diferentes tratamentos, para os ciclos de cultivos 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021.

| Tratamento | Altura planta (cm) | Altura espiga (cm) | Diâmetro colmo (cm) | Comp. espiga (cm) | Diâmetro espiga (cm) | Fileiras/ espiga (n°) | Grãos/ fileira (n°) |
|------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| Ciclo de cultivo | | | | | | | |
| 2018/2019 | | | | | | | |
| SD/SD | 258 a | 121 a | 1,9 a | 18 a | 4,9 a | 16 a | 31 a |
| RP/SD | 256 a | 124 a | 2,1 a | 17 a | 4,8 a | 16 ab | 31 a |
| CM/SD | 247 a | 118 a | 2,0 a | 16 a | 4,6 ab | 16 ab | 29 a |
| PC/SD | 218 b | 104 b | 1,7 a | 15 a | 4,5 ab | 15 ab | 25 ab |
| SC/SD | 235 b | 99 b | 1,9 a | 15 a | 4,0 b | 14 b | 19 b |
| Média | 243 | 113 | 1,9 | 16 | 4,6 | 15 | 27 |
| CV | 8 | 8 | 16 | 19 | 14 | 9 | 24 |
| 2019/2020 | | | | | | | |
| SD/SD | 209 a | 100 a | 2,4 a | 18 a | 4,6 a | 17 a | 29 a |
| RP/SD | 208 a | 100 a | 2,3 a | 17 a | 4,5 a | 16 a | 28 ab |
| CM/SD | 186 b | 83 b | 2,1 ab | 16 a | 4,5 a | 16 a | 27 ab |
| PC/SD | 180 b | 77 b | 2,0 ab | 16 a | 4,3 a | 15 a | 27 ab |
| SC/SD | 161 c | 64 c | 1,8 b | 15 a | 4,4 a | 16 a | 23 b |
| Média | 189 | 85 | 2,1 | 16,6 | 4,4 | 16 | 26 |
| CV | 7 | 85 | 16 | 11 | 6 | 10 | 15 |
| 2020/2021 | | | | | | | |
| SD/SD | 195 a | 75 a | 2,2 a | 18 a | 4,8 a | 14 a | 33 ab |
| RP/SD | 189 ab | 67 ab | 1,8 a | 16 a | 4,8 a | 14 a | 35 a |
| CM/SD | 180 ab | 62 ab | 1,9 a | 17 a | 4,5 a | 13 a | 33 ab |
| PC/SD | 167 bc | 54 b | 1,4 b | 14 b | 4,0 b | 13 a | 26 bc |
| SC/SD | 146 c | 38 c | 1,2 b | 12 b | 3,9 b | 12 a | 24 c |
| Média | 175 | 59 | 2 | 16 | 4 | 13 | 30 |
| CV | 10 | 20 | 19 | 11 | 7 | 11 | 20 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo. Médias seguidas pela mesma letra na coluna em cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

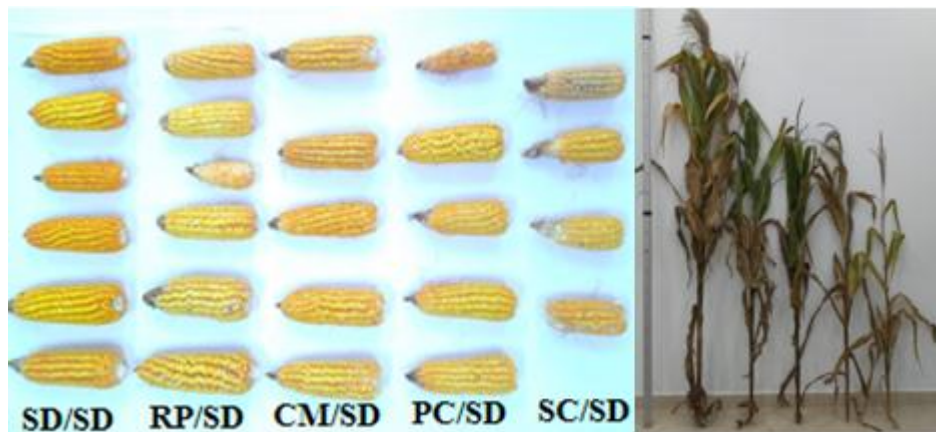
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

6.1.2.3 Aspectos visuais da produção de milho

O aspecto visual comprova as diferenças entre os componentes de rendimentos discutidos no item anterior. O tratamento SD/SD apresenta um aspecto mais vigoroso em relação ao tamanho de espigas (Figura 11). Para cinco plantas amostradas no tratamento

SD/SD, foram produzidas seis espigas, em comparação com o tratamento SC/SD que para o mesmo número de plantas amostradas, foram produzidas quatro espigas, o que se refletiu na produtividade de grãos, como pode ser observado (Tabela 8). Também se observa homogeneidade no tamanho e a uniformidade de coloração entre as espigas no tratamento SD/SD, em comparação com o RP/SD, PC/SD e SC/SD. À medida que o grau de mobilização do solo ocasionado pelos diferentes preparos antecedentes a esta pesquisa aumentaram, o componente altura de plantas diminuiu, mesmo com a conversão de diferentes sistemas de manejo para SD, implantado igualmente em todos os tratamentos. Os reflexos do efeito residual do uso e manejo do solo permaneceram nesta pesquisa.

Figura 11 - Aspecto visual das espigas e das hastes de milho nos diferentes tratamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

6.1.3 Características das chuvas naturais

6.1.3.1 Número e altura de chuvas

Entre abril de 2018 e março de 2021, ocorreu um total de 286 chuvas naturais, na qual, 129 foram classificadas como chuvas erosivas (Tabela 10), ou seja, com altura superior a 10 mm em intervalo de até 6 horas sem chuva, e/ou 6 mm em até 15 minutos. O número de chuvas não erosivas, caracterizadas com altura inferior a 10 mm num intervalo superior a 6 horas, foi de 157 eventos. As chuvas erosivas e não erosivas, correspondem, portanto, a uma proporção de 45 e 55% do total de chuvas, respectivamente, uma proporção semelhante aquela observada por Bertol et al. (2002), com dados de 10 anos, Schick et al. (2014) com média histórica de 20 anos (1989 a 2012), e Wolschick (2018) entre 2015 e 2018, para o mesmo local.

Tabela 10 - Valores mensais do número e altura de chuvas erosivas, não erosivas e o total de chuvas observadas entre abril de 2018 e março de 2021, em Lages – SC.

| Mês ano | Erosiva | Não erosiva | Total | Erosiva | Não erosiva | Total |
|----------------|-------------------|--------------------|--------------|------------------------|--------------------|--------------|
| | Número..... | | | Altura (mm)..... | | |
| 04 2018 | 1 | 1 | 2 | 10 | 1 | 11 |
| 05 2018 | 3 | 2 | 5 | 59 | 13 | 72 |
| 06 2018 | 5 | 4 | 9 | 104 | 14 | 118 |
| 07 2018 | 2 | 7 | 9 | 59 | 25 | 84 |
| 08 2018 | 4 | 2 | 6 | 90 | 5 | 95 |
| 09 2018 | 5 | 4 | 9 | 199 | 8 | 207 |
| 10 2018 | 3 | 16 | 19 | 101 | 57 | 158 |
| 11 2018 | 5 | 4 | 9 | 122 | 13 | 135 |
| 12 2018 | 8 | 7 | 15 | 226 | 28 | 254 |
| 01 2019 | 5 | 8 | 13 | 88 | 28 | 116 |
| 02 2019 | 5 | 6 | 11 | 97 | 25 | 122 |
| 03 2019 | 1 | 11 | 12 | 32 | 42 | 75 |
| 04 2019 | 4 | 5 | 9 | 80 | 20 | 100 |
| 05 2019 | 7 | 4 | 11 | 202 | 18 | 220 |
| 06 2019 | 1 | 1 | 2 | 10 | 1 | 11 |
| 07 2019 | 3 | 1 | 4 | 90 | 3 | 93 |
| 08 2019 | 1 | 3 | 4 | 19 | 14 | 33 |
| 09 2019 | 2 | 4 | 6 | 29 | 15 | 45 |
| 10 2019 | 7 | 4 | 11 | 192 | 16 | 208 |
| 11 2019 | 5 | 3 | 8 | 164 | 19 | 183 |
| 12 2019 | 4 | 4 | 8 | 129 | 11 | 141 |
| 01 2020 | 2 | 7 | 9 | 27 | 17 | 44 |
| 02 2020 | 4 | 3 | 7 | 123 | 9 | 133 |
| 03 2020 | 2 | 2 | 4 | 33 | 3 | 36 |
| 04 2020 | 1 | 0 | 1 | 22 | 0 | 22 |
| 05 2020 | 2 | 4 | 6 | 33 | 13 | 46 |
| 06 2020 | 4 | 4 | 8 | 144 | 17 | 161 |
| 07 2020 | 6 | 4 | 10 | 139 | 18 | 157 |
| 08 2020 | 3 | 1 | 4 | 151 | 8 | 158 |
| 09 2020 | 2 | 2 | 4 | 81 | 11 | 91 |
| 10 2020 | 2 | 1 | 3 | 44 | 7 | 52 |
| 11 2020 | 4 | 6 | 10 | 67 | 35 | 102 |
| 12 2020 | 5 | 8 | 13 | 160 | 29 | 189 |
| 01 2021 | 7 | 6 | 13 | 260 | 19 | 280 |
| 02 2021 | 1 | 4 | 5 | 14 | 26 | 40 |
| 03 2021 | 3 | 4 | 7 | 91 | 16 | 106 |
| Total geral | 129 | 157 | 286 | 3492 | 602 | 4095 |
| Média geral | 4 | 4 | 8 | 97 | 17 | 114 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O mês de outubro de 2018 foi o que apresentou maior número de chuvas totais, com 19 eventos, sendo apenas três erosivas, enquanto o mês de abril de 2020 apresentou somente uma chuva (erosiva). Em relação ao volume das chuvas erosivas, estas corresponderam a 85 % do total precipitado, enquanto, as chuvas não erosivas representaram apenas 15 %, concordando com vários trabalhos dessa natureza (ELTZ, 1977; JESUS FILHO, 1987; BERTOL, 1993; BERTOL, 1994a; SCHWARZ, 1997; BEUTLER, 2000; BERTOL et al., 2002b; CASSOL et al., 2008; MAZURANA et al., 2009). O mês de janeiro de 2021 apresentou o maior volume total, com 280 mm, dos quais 260 foram de eventos caracterizados como chuvas erosivas. O mês de abril de 2018 e junho de 2019 apresentaram os menores volumes (11 mm), com uma chuva erosiva e não erosiva para cada mês. Essa distribuição confirma o padrão de chuvas naturais para Lages – SC, com variabilidade temporal do número de chuvas erosivas e não erosivas.

6.1.4 Erosão hídrica pluvial do solo

O número de coletas realizadas nos três anos de pesquisa possibilitou agrupar os dados coletados nos diferentes tratamentos em PS totais, com as médias por ciclo de cultivo e as médias de PA por ciclo de cultivo.

6.1.4.1 Perdas de solo

Apesar da elevada cobertura superficial presente em todos os tratamentos, as PS apresentaram ampla variação numérica (Tabela 11), totalizando 204 kg ha⁻¹ para SD/SD, 313 kg ha⁻¹ para RP/SD, 397 kg ha⁻¹ para CM/SD, 930 kg ha⁻¹ para PC/SD e 1453 kg ha⁻¹ para o tratamento SC/SD. Cogo et al. (2003) enfatizam que a cobertura do solo tem ação direta e efetiva na diminuição da EHP, além de reduzir a energia cinética das gotas de chuva, atuando na diminuição da velocidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, na capacidade da escoamento superficial em erodir o solo. Porém, mesmo com a mudança de sistemas de manejo para SD, sabe-se que o efeito residual de uso e manejo anterior prolonga-se por algum tempo, refletindo-se nas PS.

As PS por ciclo de cultivo diminuíram em todos os tratamentos, ocorrendo de forma mais acentuada nos tratamentos PC/SD e SC/SD. No primeiro ciclo de cultivo (07/05 a 15/10/2018), a diferença entre o tratamento testemunha (SD/SD) e PC/SD e SC/SD era de 7 e 10 vezes, respectivamente, enquanto, ao final do último ciclo (30/10/2020 a 06/03/2021) essa diferença se reduziu para 3 vezes, em ambos os tratamentos. Na média, a diferença do

tratamento testemunha (SD/SD) foi de 1,5, 1,9, 4,6, e 7,1 vezes, em relação aos tratamentos RP/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD, respectivamente. No primeiro ano agrícola de conversão de manejos para SD, Wolschick (2018) obteve no primeiro ano agrícola de conversão de manejos para SD uma diferença de PS de 15 vezes entre SD/SD e SC/SD, utilizado o mesmo consórcio de aveia, nabo forrageiro e ervilhaca no período de outono/inverno e milho no verão.

Tabela 11 - Valores de altura de chuva (AC) e de perdas de solo (PS) por ciclo de cultivo e totais no período de 2018 a 2021 (média de duas repetições), em um Cambissolo Húmico, em Lages – SC.

| Ciclo de cultivo | AC (mm) | Tratamentos | | | | |
|-----------------------------|-------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|-------------|
| | | SD/SD | RP/SD | CM/SD | PC/SD | SC/SD |
| | | Perdas de solo (kg ha ⁻¹) | | | | |
| 1 (07/05/2018 a 15/10/2018) | 497 | 57 | 87 | 147 | 388 | 581 |
| 2 (01 11 2018 a 14 05 2019) | 756 | 34 | 62 | 69 | 159 | 321 |
| 3 (24 05 2019 a 28 10 2019) | 434 | 13 | 36 | 31 | 117 | 143 |
| 4 (01 11 2019 a 07 04 2020) | 540 | 48 | 50 | 52 | 67 | 194 |
| 5 (15 04 2020 a 01 10 2020) | 629 | 24 | 37 | 43 | 104 | 125 |
| 6 (30 10 2020 a 06 03 2021) | 501 | 29 | 42 | 54 | 94 | 88 |
| Total | 3492 | 204 | 313 | 397 | 930 | 1453 |
| Média | 582 | 34 | 52 | 66 | 155 | 242 |
| D.P. | 98 | 16 | 20 | 41 | 118 | 185 |
| C.V.% | 17 | 47 | 38 | 63 | 76 | 76 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Lanzanova et al. (2013) observaram alterações temporais das taxas de escoamento da água e das PS provocadas pela transição do PC do solo para o sistema SD, em experimento de longa duração. Os resultados evidenciaram que o preparo do solo promoveu aumento da EHP e, conseqüentemente, os efeitos desses permaneceram significativos pelo menos até três anos após a conversão para SD. Também apresentaram que o uso de culturas de cobertura de inverno ou de verão gerou estabilização mais rápida do solo, bem como menores perdas de solo e água do que o pousio invernal, nos primeiros anos após o preparo do solo.

Isoladamente, a cobertura do solo por resíduos vegetais é o fator mais importante na dissipação da energia de impacto das gotas da chuva na superfície do solo (FOSTER, 1982), visto que ela pode evitar a desagregação de suas partículas. Ao longo de todo o período experimental os resíduos culturais das espécies cultivadas foram mantidos na superfície do

solo e proporcionaram cobertura de 100% em todos os tratamentos, reduzindo o impacto das gotas de chuva e dissipando a energia desagregante das gotas sobre o solo.

A introdução de plantas de cobertura do solo, antecedendo a cultura do milho em SD resulta na melhoria da estabilidade estrutural do solo e, isso pode ser atribuído ao sistema radicular das gramíneas e à taxa de decomposição das leguminosas, criando um ambiente favorável à agregação, pela ação das raízes, cobertura do solo, fornecimento de material orgânico e conservação da umidade favorável à ação de microrganismos (CAMPOS et al., 1999). Tais fatores, provavelmente, favoreceram a formação e conservação dos agregados do solo, ficando claro, o efeito ocasionado pelos cultivos em proteger o solo dos efeitos causadores da EHP. O sistema radicular profundo e volumoso dessas plantas pode, ainda, ter contribuído para agregação. Visto que, as raízes, em geral, exercem pressão sobre as partículas do solo, promovendo sua aproximação (BAYER; MIELNICZUK, 2008; CALONEGO; ROSOLEM, 2008).

A descontinuidade do preparo do solo, a ausência do tráfego de máquinas e a pressão das raízes das plantas, proporcionada pela conversão de manejos com algum tipo de preparo para SD, favoreceu a reconsolidação do solo nos tratamentos com histórico convencional, modificando as condições de superfície. Streck e Cogo (2003) observaram que a descontinuidade do preparo do solo, em diferentes tratamentos, promoveu a reconsolidação da superfície do solo, aumentando a resistência à EHP em todos os tratamentos estudados. Independentemente do cultivo, a reconsolidação do solo após a descontinuidade do preparo diminuiu as PS por EHP, mas não as taxas de escoamento superficial. Em estudos sobre a qualidade física do solo para fins de controle da EHP foram desenvolvidos por Streck (1999) e Volk (2002, 2006) no Estado do Rio Grande do Sul, Streck (1999) observou que, após 2,5 anos sem preparar o solo, a sua superfície se consolidou ao ponto em que a erosão foi reduzida em 81 e 93 %, respectivamente nos tratamentos sem e com cultivo, comparada à erosão ocorrida no solo recém-preparado pelo método convencional. Volk (2006) também observou que a suspensão do preparo do solo efetivamente consolidou a superfície e resultou em valores decrescentes de PS por erosão hídrica com o passar do tempo.

6.1.4.2 Perdas de água

Foram realizadas 107 coletas de enxurrada referentes às chuvas erosivas, com média de 31 mm por evento, ao qual totalizou 3492 mm de altura de chuva acumulados em 36 meses (Tabela 12 e 13). As médias de PA observadas em três anos de pesquisa foi de 5; 6; 7; 12 e 15%, respectivamente, para SD/SD, RP/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD.

Tabela 12 - Valores de altura de chuva (AC) e de perdas de água (PA) em relação ao total de chuva por ciclo de cultivo e totais no período de 2018 a 2021, (média de duas repetições) em um Cambissolo Húmico, em Lages – SC.

| Item | AC (mm) | SD/SD | RP/SD | Tratamentos | | |
|--------------------|------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| | | | | CM/SD | PC/SD | SC/SD |
| Perdas de água (%) | | | | | | |
| Total | 3492 | 5 | 6 | 7 | 12 | 15 |
| Média/chuva | 31 | 5 | 6 | 7 | 12 | 15 |
| D.P | 19 | 7 | 6 | 8 | 14 | 16 |
| C.V% | 59 | 148 | 114 | 116 | 113 | 109 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo. Nota: DP = Desvio Padrão; CV (%) = Coeficiente de variação.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As PA não seguiram a mesma tendência observada para as PS. As PA, em geral, são menos afetadas do que as PS pelos sistemas de preparo e manejo utilizados (COGO et al., 1984; BERTOL et al., 1997). A menor eficácia da SD no controle das PA, comparada à PS, deve-se ao fato de que, independentemente do tipo de preparo utilizado, o solo apresenta capacidade finita de infiltração de água, a partir da qual a taxa de enxurrada tende a se igualar em diferentes tipos de preparo (BERTOL et al., 2007). No entanto, os valores de PA observados foram inferiores à média histórica apresentada por Schick et al. (2017), que observaram perdas de 9; 15; 24; e 38%, para os tratamentos correspondentes a SD/SD, CM/SD, PC/SD, e SC/SD. Wolschick (2018) observou redução das PA ao final do terceiro ano de conversão de manejos para SD, com PA em 7, 15, 16, 30 e 29% para os tratamentos SD/SD, RP/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD, respectivamente.

As PA por ciclo de cultivo (Tabela 13) diminuiram em todos os tratamentos, de forma mais acentuada nos tratamentos PC/SD e SC/SD. No primeiro ciclo de cultivo (07/05 a 15/10/2018), a diferença entre o tratamento testemunha (SD/SD) e PC/SD e SC/SD era de 3 vezes, respectivamente, enquanto que ao final do último ciclo (30/10/2020 a 06/03/2021) essa diferença se reduziu para 1,4 vezes, em ambos os tratamentos.

Tabela 13 - Valores individuais de altura (AC) de chuvas erosivas, perdas de água médias observadas no período de 2018 a 2021 (média de duas repetições), em um Cambissolo Húmico, em Lages – SC.

| Ciclo | AC (mm) | Tratamentos | | | | |
|-----------------------------|------------|--------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| | | SD/SD | RP/SD | CM/SD | PC/SD | SC/SD |
| | | Perdas de água (%) | | | | |
| 1 (07 05 2018 a 15 10 2018) | 497 | 7 | 7 | 9 | 20 | 21 |
| 2 (01 11 2018 a 14 05 2019) | 756 | 4 | 5 | 6 | 11 | 13 |
| 3 (24 05 2019 a 28 10 2019) | 434 | 3 | 4 | 6 | 16 | 13 |
| 4 (01 11 2019 a 07 04 2020) | 540 | 5 | 4 | 6 | 6 | 15 |
| 5 (15 04 2020 a 01 10 2020) | 629 | 5 | 8 | 8 | 12 | 15 |
| 6 (30 10 2020 a 06 03 2021) | 501 | 7 | 6 | 8 | 10 | 10 |
| Média | 559 | 5 | 6 | 7 | 12 | 15 |
| D.P. | 116 | 1 | 2 | 1 | 5 | 4 |
| C.V.% | 21 | 26 | 29 | 21 | 40 | 24 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Observa-se que as PA apresentaram tendência de diminuição apenas nos tratamentos PC/SD e SC/SD, entretanto, houve variação relativamente pequena entre os tratamentos e entre os ciclos de cultivo do solo. A conversão para SD promoveu a manutenção integral dos resíduos culturais sobre o solo, o que protegeu a superfície do selamento, aumentou a infiltração e reduziu o escoamento superficial, além disso, o cultivo consorciado de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro no período de outono/inverno seguido de milho na primavera/verão, aumentou a macroporosidade do solo (Tabela 6) e a continuidade de poros, permitindo maior movimento de água no perfil do solo. Diferentes autores, em diferentes tipos de solo, observaram redução nas PA à medida que houve diminuição de intensidade do preparo do solo e aumento da cobertura superficial (BERTOL et al., 1997; BEUTLER et al., 2003; HERNANI et al., 1997; LEITE et al., 2004; PANACHUKI et al., 2011; SCHICK et al., 2000b).

6.2 SEÇÃO 2

Em dois momentos anteriores a esta pesquisa foram avaliadas as condições químicas e físicas do solo; a MSPA do cultivo consorciado de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro no período de outono/inverno; milho no período de primavera/verão; e a EHP em diferentes sistemas de manejo do solo convertidos para SD. Os resultados anuais de PS e PA fazem parte de uma série histórica obtida por diferentes autores (SCHICK, 2014; BANDEIRA, 2015; WOLSCHICK, 2018), por isso, foram estabelecidas linhas do tempo para comparação de tratamentos e verificação dos efeitos ocasionados pela conversão de diferentes sistemas de manejo e uso do solo para SD.

6.2.1 Condições químicas e físicas do solo

6.2.1.1 Fósforo, potássio, cálcio, magnésio e pH

A conversão de sistemas de manejo à SD tem desencadeado uma série de mudanças nas condições químicas do solo, especialmente quanto à disponibilidade de nutrientes. A tendência observada é concentração de nutrientes, especialmente de P, K, Ca e Mg na camada superficial do solo, visto que, além de não haver mobilização do solo, verifica-se o acúmulo de nutrientes no tecido das plantas cultivadas, com posterior decomposição e liberação desses nutrientes nas camadas superficiais (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

De modo geral, houve variação no teor de P extraível, em todos os tratamentos, nos três períodos amostrados (Figura 12). Os teores de P observados no ano 2021 são intermediários em relação a 2015 e 2018. Na camada de 0 – 2,5 cm, na média dos tratamentos (Figura 12f), o teor de P aumentou de 13,7 mg dm⁻³ (classe de disponibilidade baixa para P de acordo com CQFS RS/SC, 2016) para 74,9 mg dm⁻³ (classe de disponibilidade muito alta para P de acordo com CQFS RS/SC, 2016), significando um aumento de 5,5 vezes, entre os anos 2015 e 2018 (WOLSCHICK, 2018). No entanto, no ano 2021 essa média foi de 18,3 mg dm⁻³ de P no solo, enquadrando-se na classe de disponibilidade alta (12,1 - 24,0 mg dm⁻³) (CQFS, 2016). A redução de P observada entre 2018 e 2021, pode ser justificada pelo transporte deste elemento através do escoamento superficial, durante este intervalo de tempo.

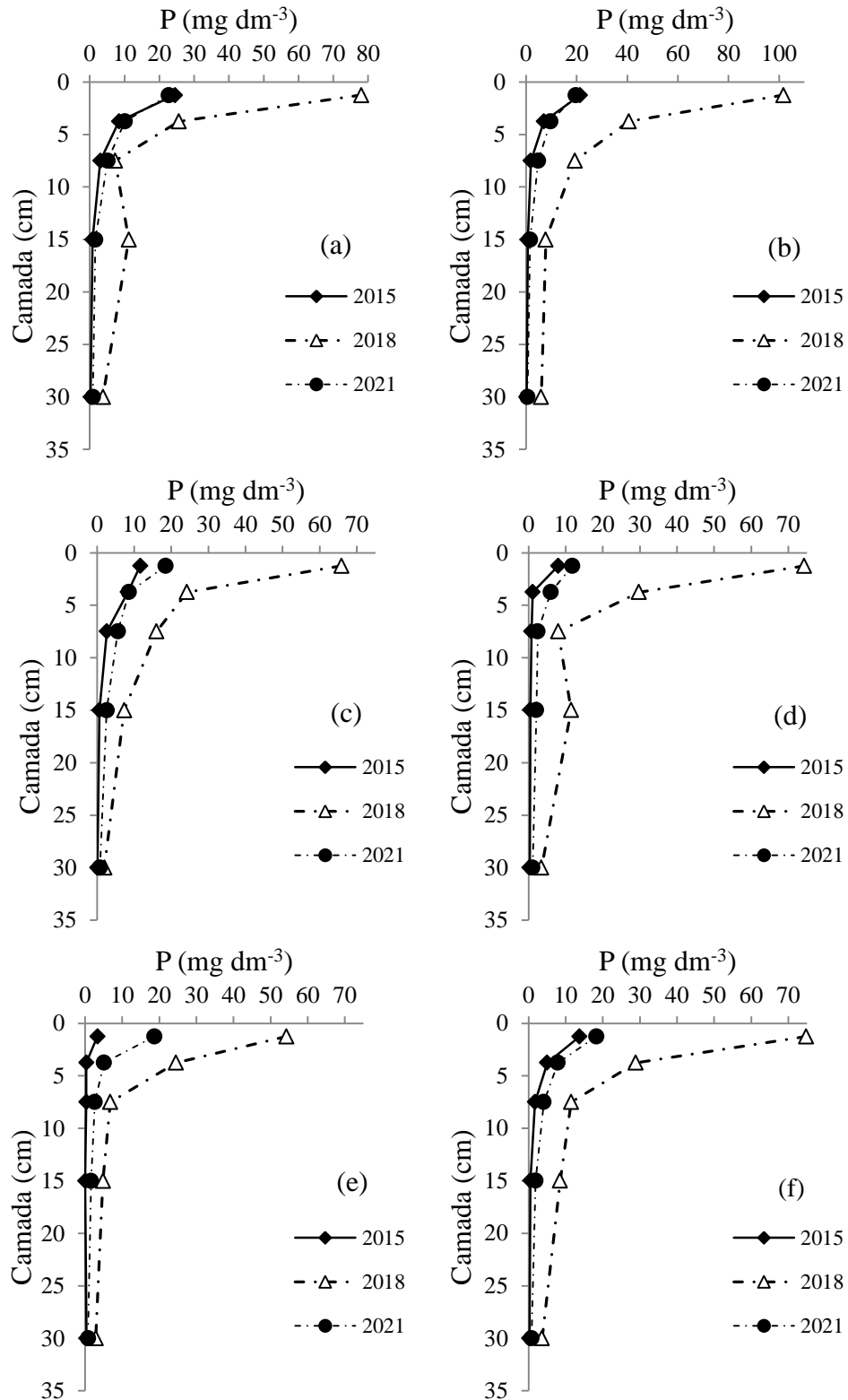
Os teores de K foram os que mais variaram entre períodos de amostragem (Figura 13f), com valores de 275, 653 e 262 mg dm⁻³ (na camada de 0 – 2,5 cm) entre os anos 2015, 2018 e 2021, respectivamente na média dos tratamentos. De maneira geral, os teores de K na camada superficial do solo (0-2,5 cm) são considerados muito altos em todos os tratamentos

(CQFS RS/SC 2016), com as camadas inferiores seguindo a mesma tendência dos teores observados para o P.

Os teores de cálcio, em todos os tratamentos, foram inferiores no ano 2021, em relação aos anos 2015 e 2018, respectivamente (Figura 14). Mesmo assim os teores observados nos três períodos apresentaram valores de Ca muito altos (CQFS RS/SC 2016) até a camada de 10 – 20 cm. Esse efeito pode ser justificado pela correção da acidez do solo com calcário e fertilizantes incorporados ao solo mediante a realização do preparo padrão de cada tratamento no momento anterior à conversão do manejo para SD, realizada em 2015 (WOLSCHICK, 2018). Por outro lado, o magnésio (Mg) apresentou comportamento inverso em relação aos demais elementos com valores superiores até a camada amostrada entre 5 – 10 cm, amostrada ao final desta pesquisa em relação aos dois períodos anteriores (Figura 15).

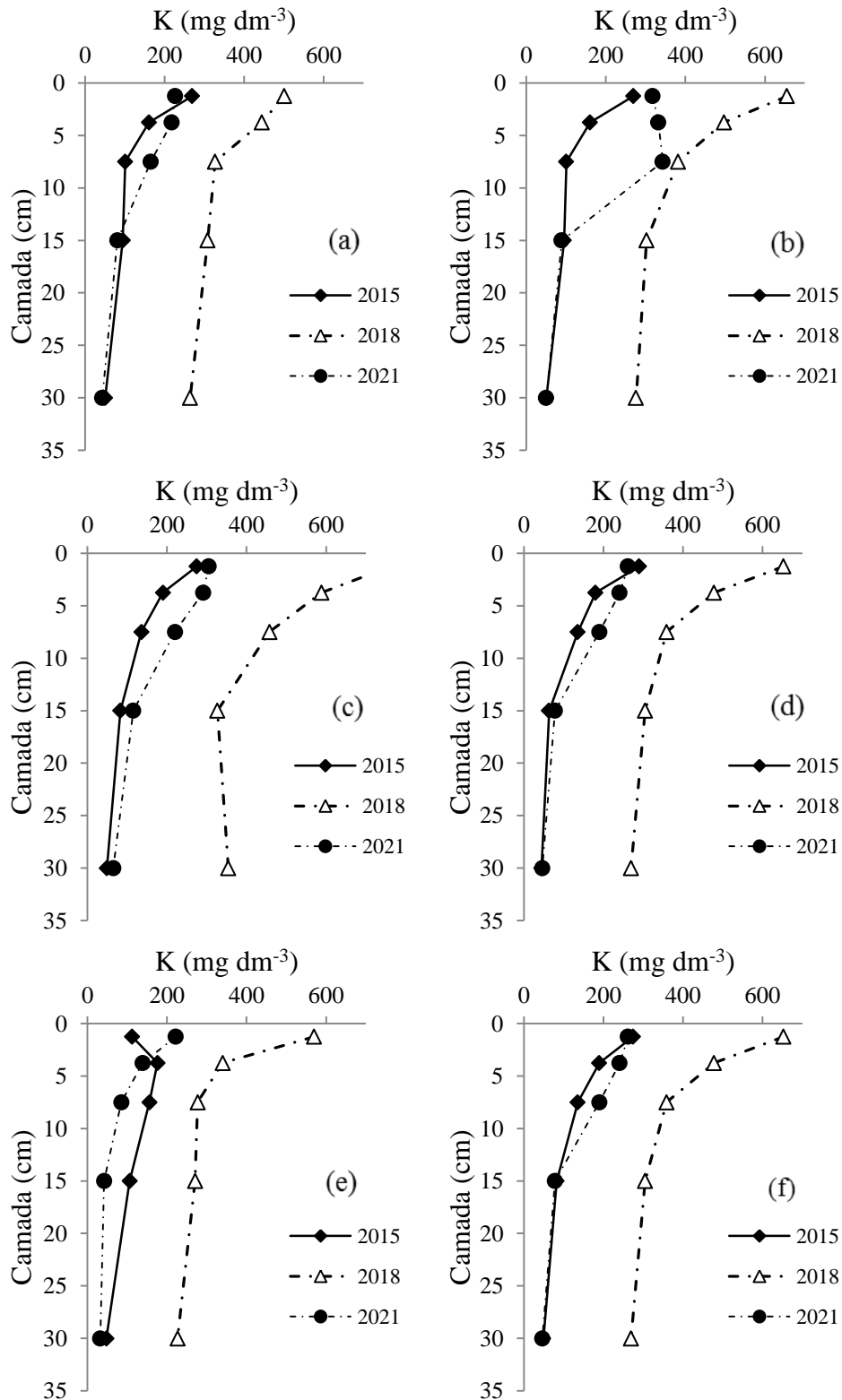
Em relação ao pH do solo, o valor observado no ano 2021 foi inferior ao valor observado no ano 2018 (Figura 16), o que por sua vez foi inferior ao ano 2015 (camada 0 – 2,5). As camadas inferiores apresentaram uma tendência inversa em relação à camada superficial. Além do processo de acidificação natural que ocorre no solo ao longo dos cultivos, com a liberação de ácidos orgânicos através da decomposição da palhada (BAYER, 1992), bem como, o efeito acidificante provocado pela utilização contínua de adubos nitrogenados amoniacais (BLEVINS et al., 1983), o aumento da acidez do solo ao longo do tempo, pode ser justificado pela ausência da correção do pH do solo no decorrer desta pesquisa.

Figura 12 - Teores de fósforo (P) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



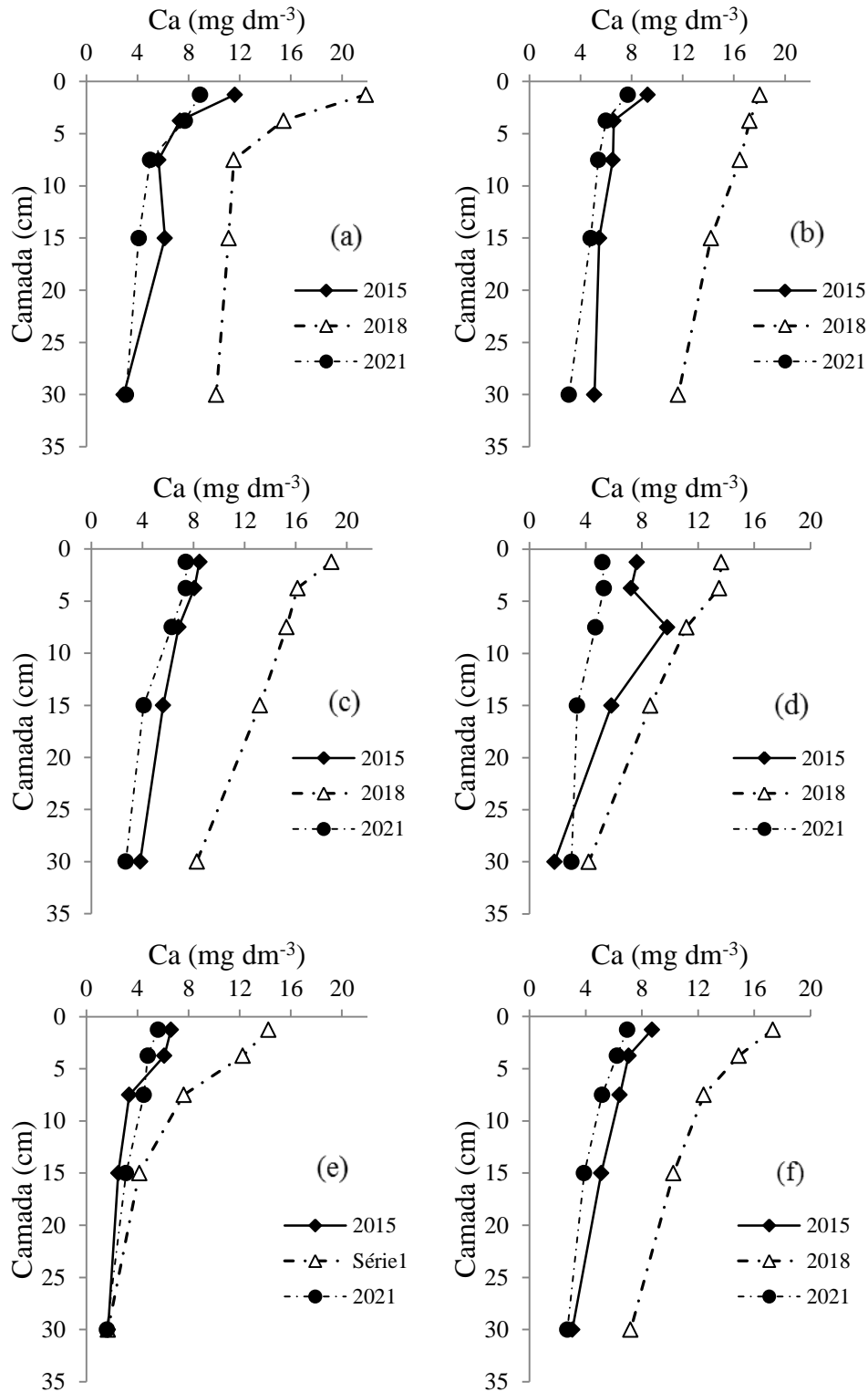
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

Figura 13 - Teores de potássio (K) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



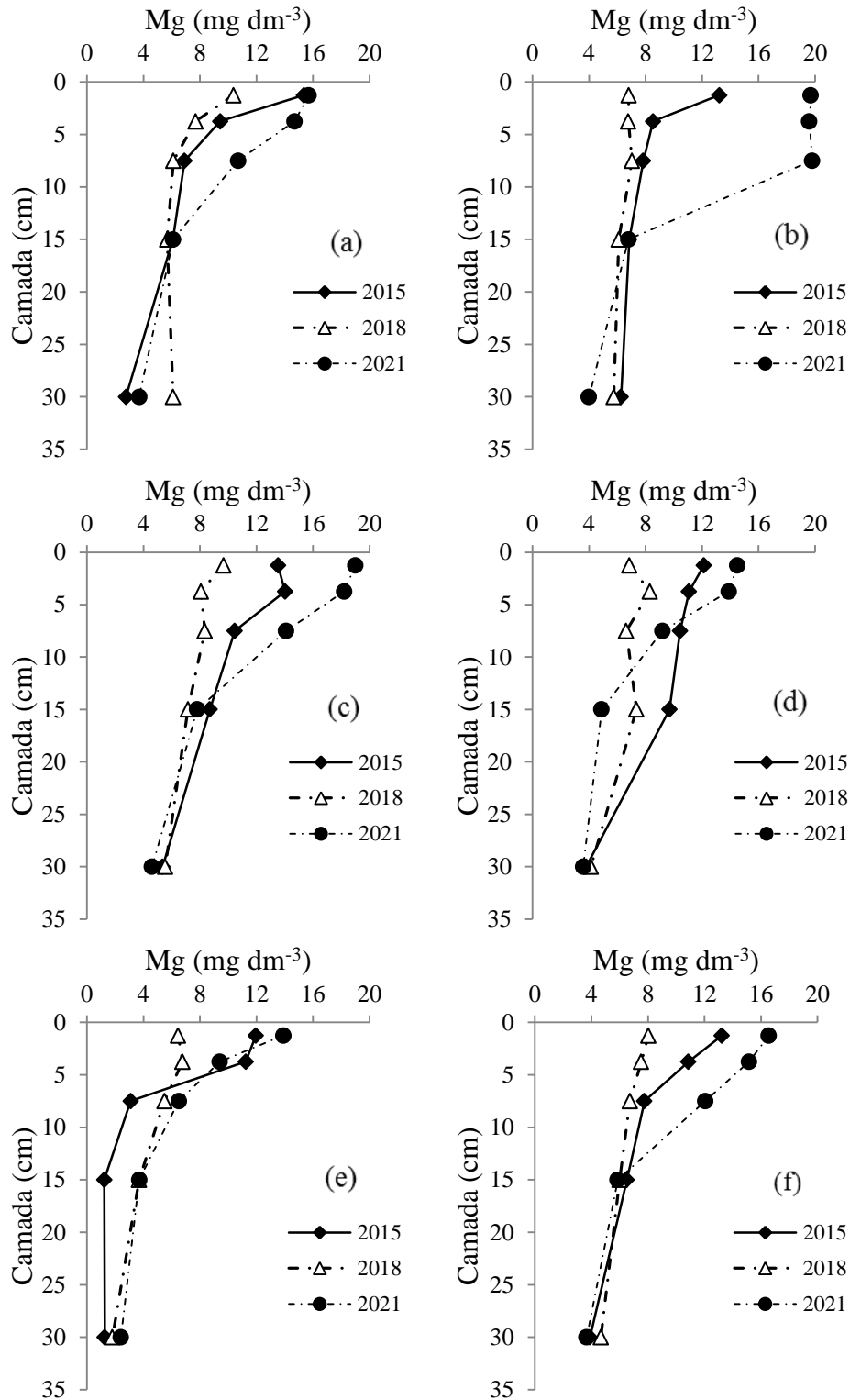
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

Figura 14 - Teores de cálcio (Ca) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



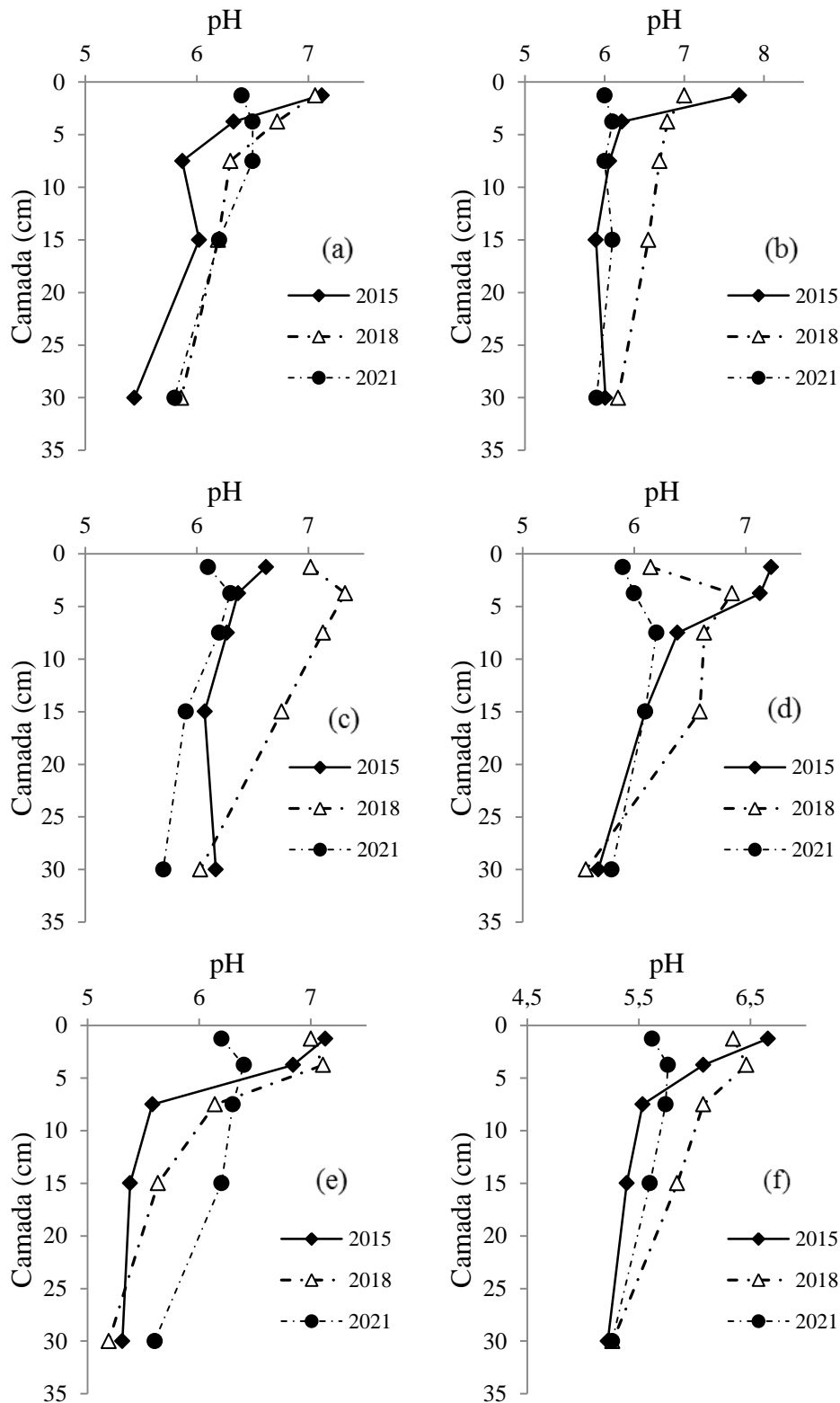
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

Figura 15 - Teores de magnésio (Mg) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

Figura 16 - pH do solo (em água) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

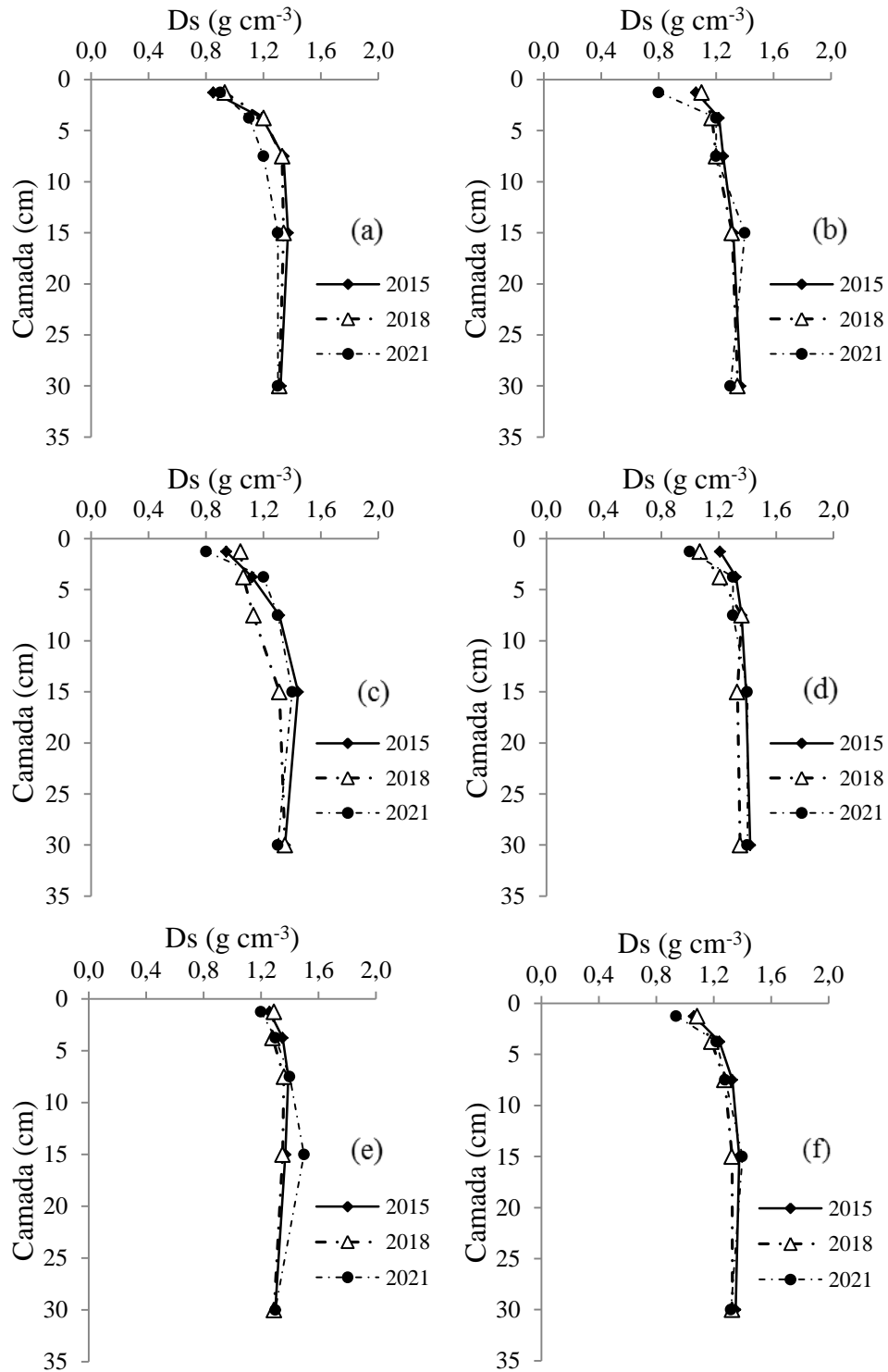
6.2.1.2 Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade

A evolução temporal da densidade do solo (Ds) em diferentes tratamentos pode ser observada na Figura 17. Na média dos tratamentos (Figura 17f), houve tendência de redução da Ds na camada superficial do solo (0 – 2,5 cm) após seis anos de conversão de diferentes sistemas de manejos para SD. O que não foi observado para as camadas inferiores amostradas, que apresentaram valores numericamente similares. Mesmo assim, os valores gerais observados em todos os anos amostrados ficaram abaixo do estabelecido por Reichert et al. (2003), que consideraram a densidade crítica de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para solos de textura média (20 a 55% de argila), caso do Cambissolo Húmico da área experimental com 40% de argila (GUADAGNIN, 2003). A mobilização do solo realizada antes da semeadura das culturas durante a fase de conversão de diferentes sistemas de manejo para SD (WOLSCHICK, 2018) e a ausência de tráfego de máquinas após o preparo, nos tratamentos CM/SD, PC/SD e SC/SD concorreu para diminuição dos valores de Ds. Além do acúmulo de resíduos culturais proporcionados pelas culturas implantadas.

Na média geral dos tratamentos (Figura 18f), os valores de porosidade total (Pt) em 2021 foram superiores, em todas as camadas amostradas em relação aos valores observados por Wolschick (2018) em 2015 e 2018, com exceção do tratamento SC/SD (Figura 18e), cujos valores de Pt não aumentaram. O maior volume de Pt nas camadas superficiais do solo em relação às camadas inferiores, é justificado, possivelmente, pelo aumento de MO decorrente das raízes das culturas, e a consequente abertura de galerias, após a decomposição das raízes, o que está de acordo com os valores de densidade do solo que aumentam em profundidade (LUCIANO et al., 2010).

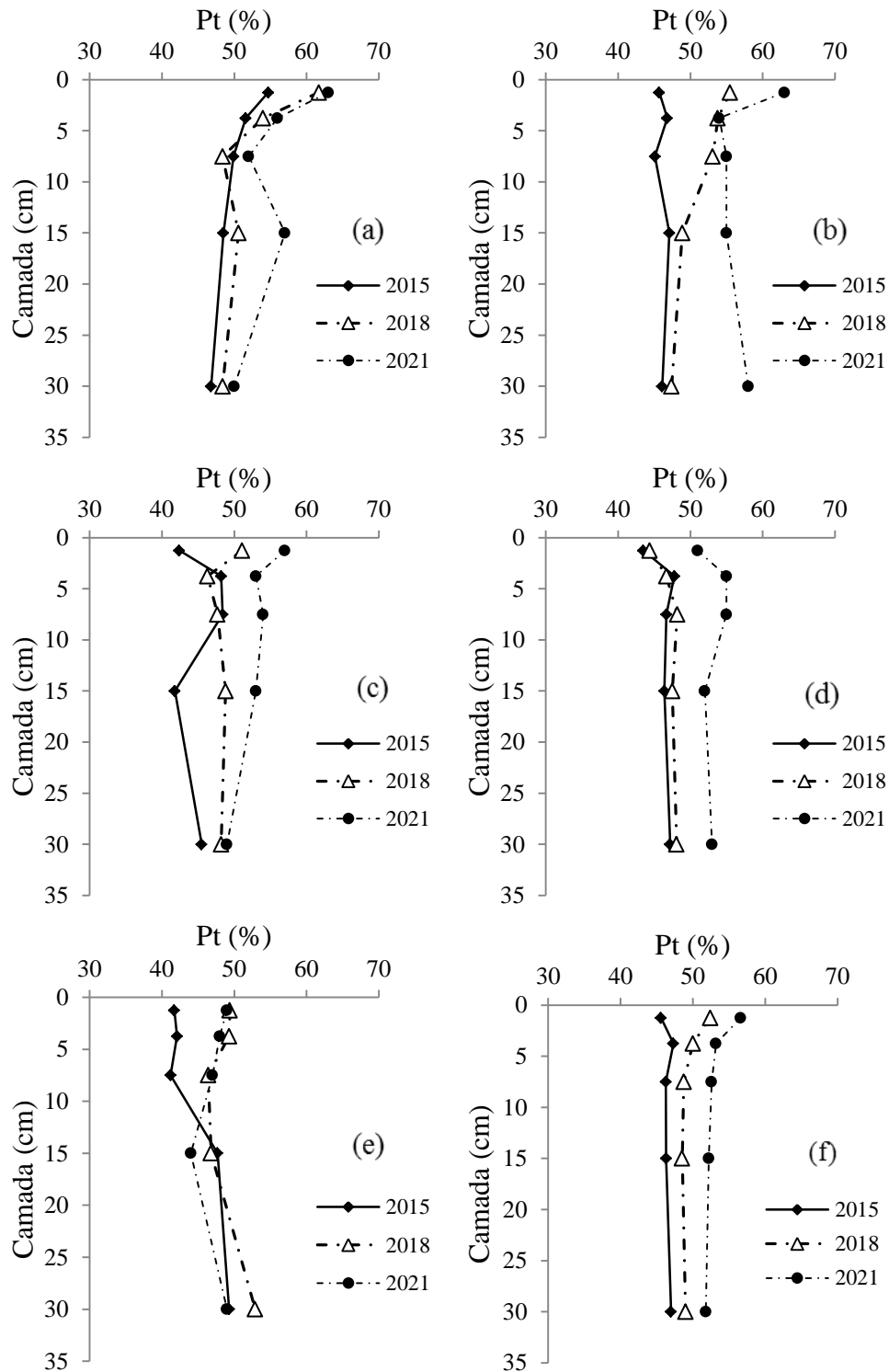
De maneira geral, a macroporosidade do solo (Ma) (Figura 19) aumentou em todos os tratamentos e camadas amostradas, em relação aos anos 2015 e 2018. Nos tratamentos RP/SD, CM/SD e PC/SD (Figura 19b, c, d) os valores de Ma ficaram acima do considerado limite crítico de 10% (XU et al., 1992) até a camada de 5 - 10 cm, o tratamento SC/SD (Figura 19a) foi o único que permaneceu abaixo do considerado limite crítico. Nos três anos amostrados, o tratamento SD/SD apresentou valores de Ma acima de 10% na camada superficial do solo (0 – 2,5 cm). Em relação à microporosidade (Figura 20), ocorreu pouca variação entre tratamentos, o que refletiu na média dos tratamentos.

Figura 17 - Densidade do solo (D_s) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



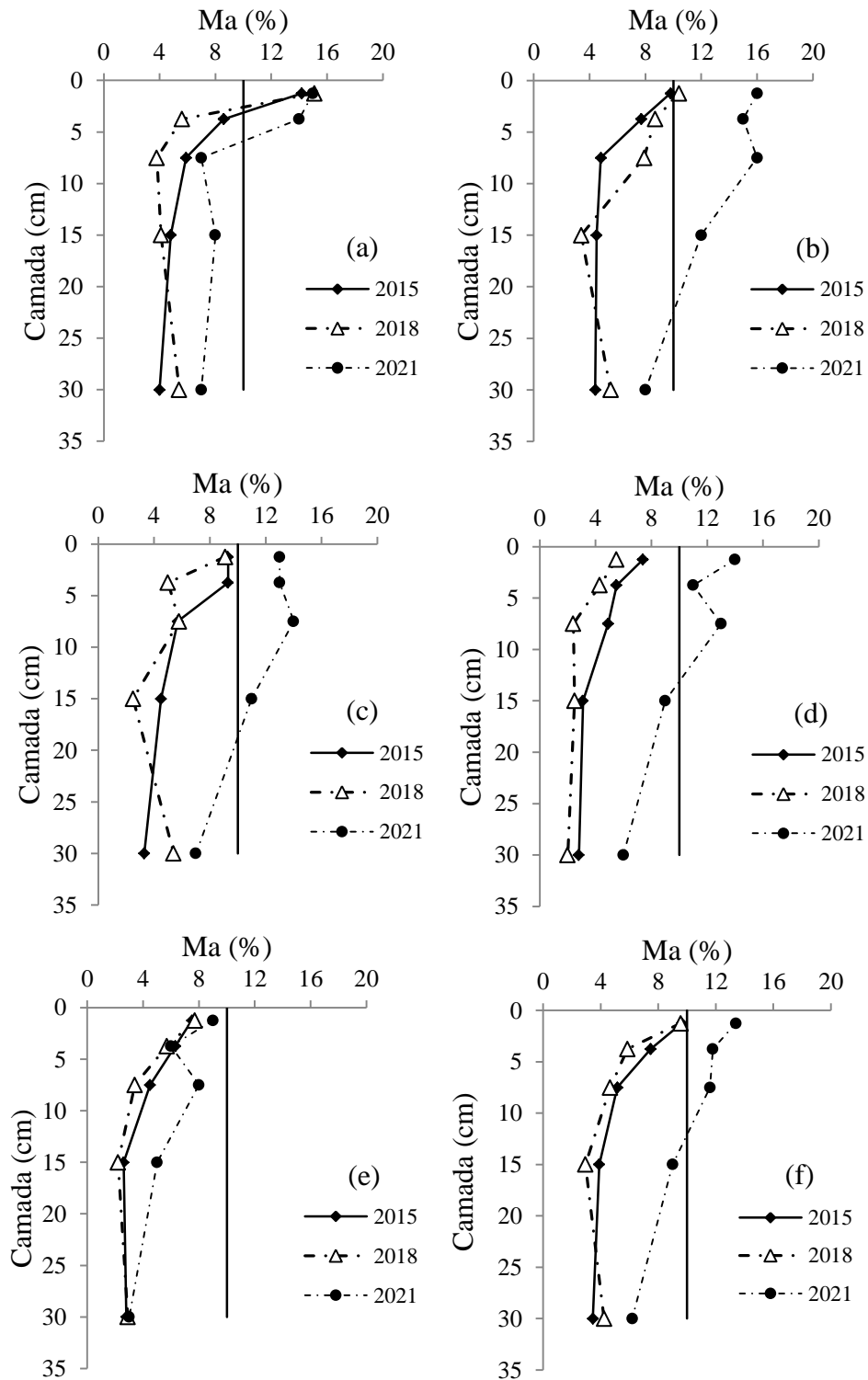
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

Figura 18 - Porosidade total do solo (Pt) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



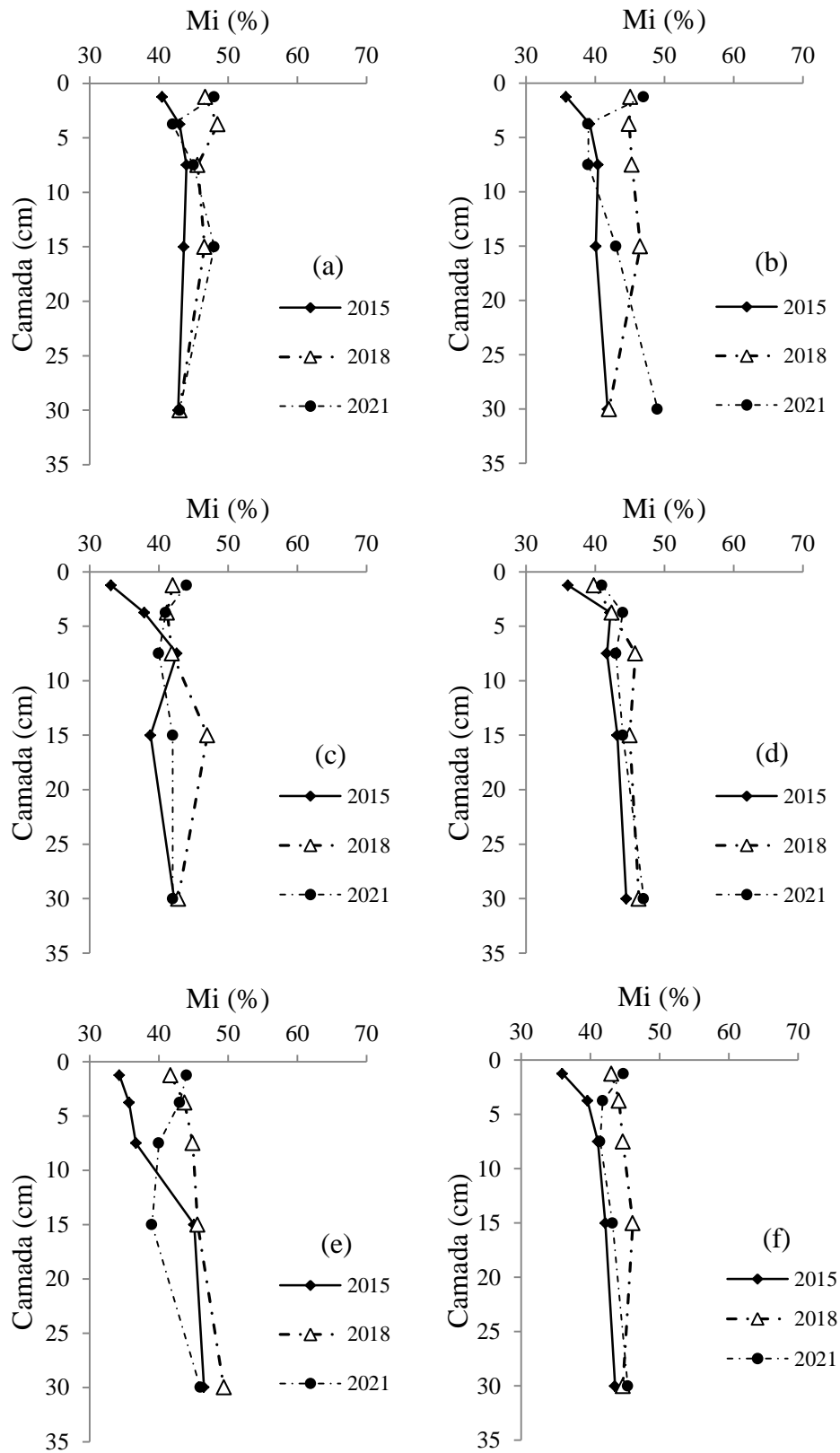
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

Figura 19 - Macroporosidade do solo (Ma) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

Figura 20 - Microporosidade do solo (Mi) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

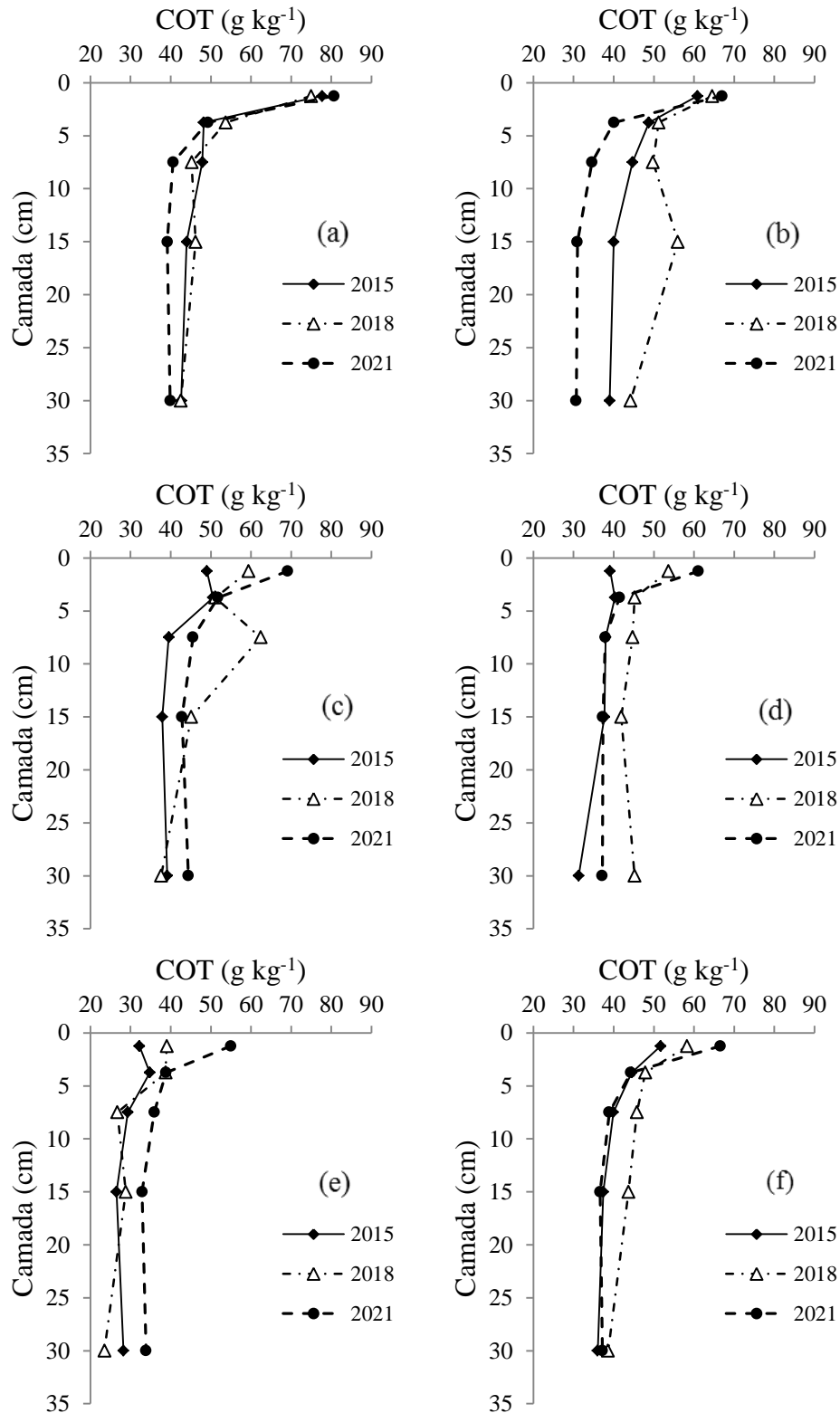
6.2.3 Carbono orgânico total e diâmetro médio ponderado de agregados

Na média dos tratamentos, os teores de COT passaram de 52 g kg⁻¹ em 2015, para 67 g kg⁻¹ em 2021, na camada de 0 - 2,5 cm (Figura 21f), portanto, um incremento de 14% em um período de seis anos. Os tratamentos PC/SD (Figura 21d) e SC/SD (Figura 21e) foram os que mais acumularam COT na camada de 0 - 2,5 cm do solo, com aumento de 23 e 22 g kg⁻¹ de COT, respectivamente, entre os anos 2015 e 2021. A deposição superficial de resíduos vegetais, a maior concentração de raízes nas camadas superficiais do solo e a ausência de mobilização do solo, favoreceram o acúmulo e, conseqüentemente, maior estratificação de COT em comparação a preparos não conservacionistas do solo (ELTZ et al.; 1989; BAYER et al., 2004; SILVA et al., 2006).

Os valores de DMP, na média geral dos tratamentos, foram 5,49, 5,97 e 5,77 (Figura 22f) para 2015, 2018 e 2021, respectivamente. Nesta pesquisa, portanto, os valores de DMP observados, foram superiores aos observados em 2015, porém, inferiores que em 2018. O tratamento SC/SD (Figura 22e) foi o mais beneficiado pela conversão de diferentes sistemas de manejo à SD, com aumento de 2,75 mm na camada de 0 – 2,5 cm no ano 2015, para 6,07 e 5,80 nos anos 2018 e 2021, respectivamente. Seguindo a mesma tendência para as demais camadas. Nos demais tratamentos, não houve diferenças entre os valores de DMP em profundidade. Bertol et al. (2001) também não observaram aumento no DMP em profundidade em SD num Cambissolo Húmico. Indicando que o sistema de SD no longo prazo mantém o solo mais bem estruturado, enquanto preparos convencionais podem danificar a agregação do solo (ANDRADE et al., 2010).

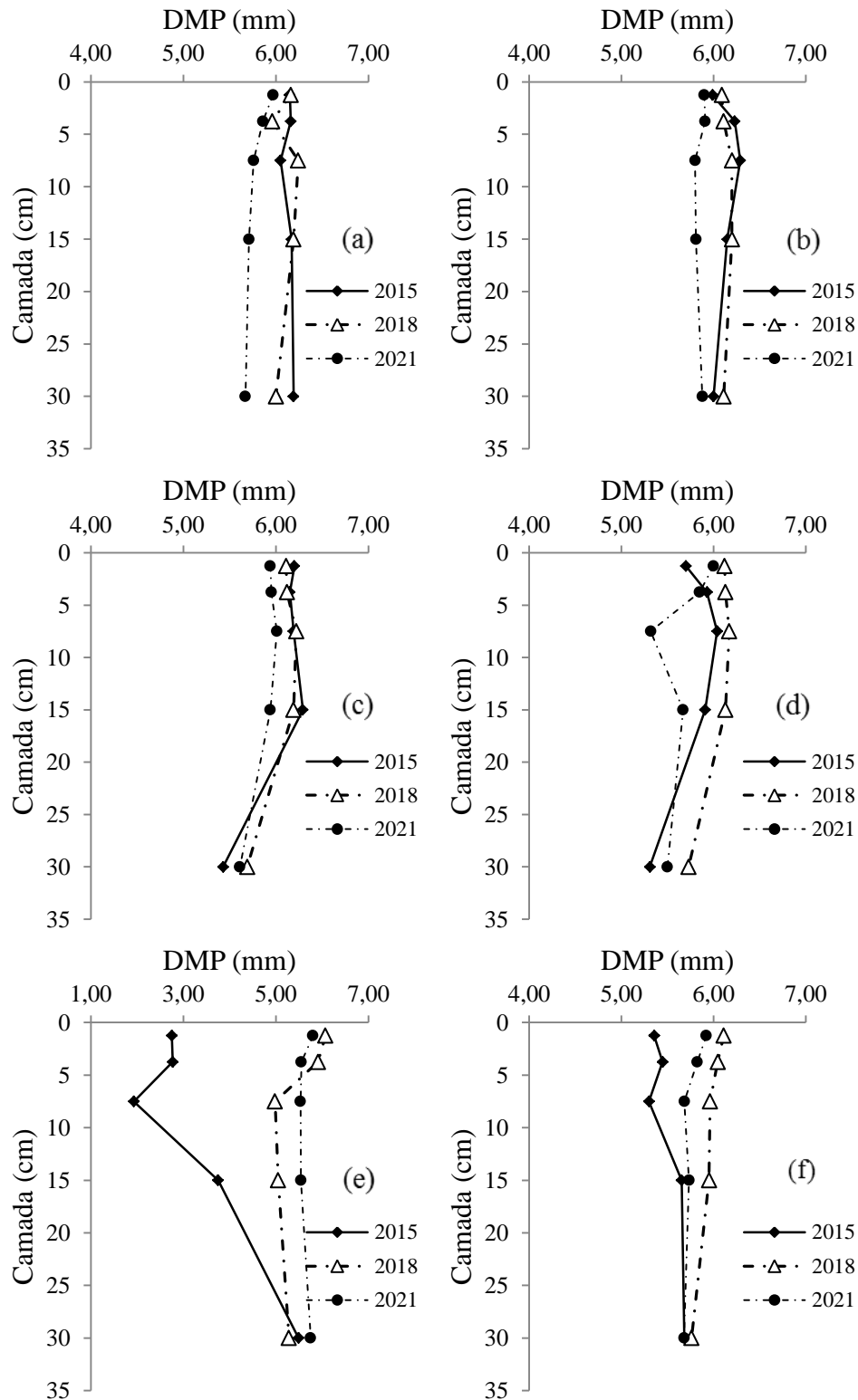
De acordo com Mielniczuk (1999), os exsudados orgânicos oriundos das raízes agem como agentes cimentantes das partículas do solo. Além disso, esses compostos são capazes de estimular a ação microbiana, que passa a liberar ácidos húmicos e polissacarídeos, substâncias que, também, atuam como agregadores das partículas minerais do solo (CASTRO FILHO et al., 1998). Nesse sentido, Castro Filho et al. (1998) constataram o aumento da agregação do solo com adição de resíduos vegetais incluindo uma espécie de relação C/N mais alta (milho) em SD.

Figura 21 - Carbono orgânico total (COT) nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

Figura 22 - Diâmetro médio ponderado (DMP), nos tratamentos SD/SD (a), RP/SD (b), CM/SD (c), PC/SD (d), SC/SD (e) e a média dos tratamentos (f) em três anos (2015, 2018 e 2021), em Cambissolo Húmico (média de duas repetições).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Wolschick (2018).

6.3 PRODUÇÃO VEGETAL

6.3.1 Massa seca da parte aérea

A produtividade de massa seca da parte aérea (MSPA) do cultivo consorciado de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro no período de outono/inverno apresentaram variações entre tratamentos ao longo dos ciclos de cultivo (Tabela 14), com 7075, 5870 e 4924 kg ha⁻¹, para os anos de 2015, 2016 e 2017, respectivamente (WOLSCHICK, 2018), enquanto nos anos 2018, 2019 e 2020, as médias foram 4505, 4541 e 3681 kg ha⁻¹, respectivamente.

Tabela 14 - Massa seca da parte aérea (MSPA) produzida pelo cultivo consorciado de ervilhaca, nabo forrageiro e aveia preta, em cada tratamento de 2015 até 2020 e milho para os ciclos de cultivo entre 2015/2016 até 2020/2021.

| Ciclo de cultivo | Tratamento | | | | | Média geral |
|------------------------|--|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | SD/SD | RP/SD | CM/SD | PC/SD | SC/SD | |
| | MSPA (kg ha ⁻¹) | | | | | |
| | Aveia, ervilhaca e nabo forrageiro (consórcio) | | | | | |
| ¹ 2015 | 8361 | 6264 | 7793 | 7146 | 5813 | 7075 |
| ¹ 2016 | 7049 | 6460 | 6200 | 5322 | 4319 | 5870 |
| ¹ 2017 | 5520 | 5694 | 5764 | 4757 | 2882 | 4923 |
| Média | 6977 | 6139 | 6586 | 5742 | 4338 | 5956 |
| 2018 | 4194 | 5639 | 4500 | 4444 | 3750 | 4505 |
| 2019 | 5096 | 5309 | 5230 | 4835 | 2233 | 4541 |
| 2020 | 4521 | 3757 | 5264 | 3521 | 1340 | 3681 |
| Média | 4604 | 4902 | 4998 | 4267 | 2441 | 4242 |
| | Milho | | | | | |
| ¹ 2015/2016 | 18397 | 17316 | 14737 | 13990 | 11005 | 15089 |
| ¹ 2016/2017 | 10840 | 10008 | 10757 | 9191 | 7463 | 9652 |
| ¹ 2017/2018 | 9343 | 8997 | 11715 | 6059 | 6593 | 8541 |
| Média | 12860 | 12107 | 12403 | 9747 | 8354 | 11094 |
| 2018/2019 | 17340 | 17490 | 17812 | 9750 | 11910 | 9762 |
| 2019/2020 | 10920 | 10680 | 8880 | 8640 | 7440 | 9799 |
| 2020/2021 | 16730 | 15030 | 16482 | 8520 | 4896 | 10219 |
| Média | 14997 | 14400 | 14391 | 8970 | 8082 | 9927 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. ¹Adaptado de Wolschick (2018).

Na média geral dos anos transcorridos, ocorreu queda de produtividade nos cultivos de outono/inverno, com média de 5956 kg ha⁻¹ após três anos de conversão de diferentes sistemas de manejo para SD (WOLSCHICK, 2018), 1714 kg ha⁻¹ a mais que o observado nesta pesquisa, que em três ciclos de cultivo obteve média de 4242 kg ha⁻¹ de MSPA. Entre os cultivos de 2015 e 2017, a diferença média entre SC/SD e SD/SD (testemunha) era de 2639 kg ha⁻¹, essa diferença diminuiu para 2163 kg ha⁻¹ na média dos três anos seguintes (2018; 2019 e 2020). A média geral da produtividade de MSPA do milho também diminuiu ao longo dos anos, mas os valores médios dos tratamentos SD/SD, RP/SD e CM/SD, foram na média, superiores nos últimos três anos em comparação ao período anterior, também de três anos.

6.3.2 Produtividade de grãos do milho

As produtividades de grãos de milho (PG) e a massa de mil grãos (MMG) obtidas em seis ciclos de cultivo são apresentadas na tabela 15. Observa-se a variação na PG e MMG, em todos os tratamentos para cada ciclo de cultivo. Para os ciclos de 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018, a média de PG foi de 9580 kg ha⁻¹, para SD/SD, 9899 kg ha⁻¹, para RP/SD, 10001 kg ha⁻¹, para CM/SD, 7461 kg ha⁻¹ para PC/SD e 6791 kg ha⁻¹, para SC/SD (WOLSCHICK, 2018).

Nesta pesquisa a média de PG foi de 7847 kg ha⁻¹, para SD/SD, 7011 kg ha⁻¹, para RP/SD, 6281 kg ha⁻¹, para CM/SD, 4537 kg ha⁻¹, para PC/SD e 3415 kg ha⁻¹ para o tratamento SC/SD, para os ciclos de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021, respectivamente. Portanto, uma queda na PG em 19, 29, 37, 39 e 50% para SD/SD, RP/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD, respectivamente. Indicando que quanto mais degradado fisicamente e quimicamente pela EHP estiver o solo, mais tempo será necessário para sua recuperação e, conseqüentemente resposta na PG. A MMG também diminuiu ao longo do tempo para todos os tratamentos, seguindo a mesma justificativa utilizada para PG.

O efeito alelopático proporcionado pela sucessão de cultivos de outono/inverno e primavera/verão também pode estar relacionado com a queda de rendimentos tanto de PG quanto de MMG.

Tabela 15 - Produtividades de grãos (PG) e massa de mil grãos (MMG) de milho em cada tratamento, para o ciclo de cultivos 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021 (média das repetições).

| Ciclo de cultivo | Tratamento | | | | | Média geral |
|------------------------|----------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | SD/SD | RP/SD | CM/SD | PC/SD | SC/SD | |
| | PG (kg ha ⁻¹) | | | | | |
| ¹ 2015/2016 | 11649 | 11236 | 10377 | 8769 | 7608 | 9928 |
| ¹ 2016/2017 | 9090 | 10009 | 10002 | 8370 | 6839 | 8862 |
| ¹ 2017/2018 | 8002 | 8451 | 9624 | 5244 | 5926 | 7449 |
| Média | 9580 | 9899 | 10001 | 7461 | 6791 | 8746 |
| 2018/2019 | 5940 | 5694 | 4770 | 4122 | 2316 | 4568 |
| 2019/2020 | 7980 | 6911 | 6645 | 5482 | 5799 | 6563 |
| 2020/2021 | 9621 | 8429 | 7429 | 4008 | 2129 | 6323 |
| Média | 7847 | 7011 | 6281 | 4537 | 3415 | 5818 |
| | MMG (kg ha ⁻¹) | | | | | |
| ¹ 2015/2016 | 321 | 325 | 314 | 302 | 262 | 305 |
| ¹ 2016/2017 | 315 | 334 | 318 | 301 | 297 | 313 |
| ¹ 2017/2018 | 282 | 315 | 299 | 252 | 242 | 278 |
| Média | 306 | 325 | 310 | 285 | 267 | 299 |
| 2018/2019 | 199 | 203 | 211 | 191 | 140 | 189 |
| 2019/2020 | 297 | 273 | 282 | 241 | 277 | 274 |
| 2020/2021 | 354 | 309 | 297 | 237 | 199 | 279 |
| Média | 283 | 262 | 263 | 223 | 205 | 247 |

Nota: SD/SD: semeadura direta implantada após semeadura direta sem preparo prévio; RP/SD: semeadura direta implantada após rotação de preparos; CM/SD: semeadura direta implantada após cultivo mínimo; PC/SD: semeadura direta implantada após preparo convencional; e SC/SD: semeadura direta implantada após solo descoberto e sem cultivo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. ¹Adaptado de Wolschick (2018).

6.4 EROÇÃO HÍDRICA PLUVIAL DO SOLO

6.4.1 Perdas de solo

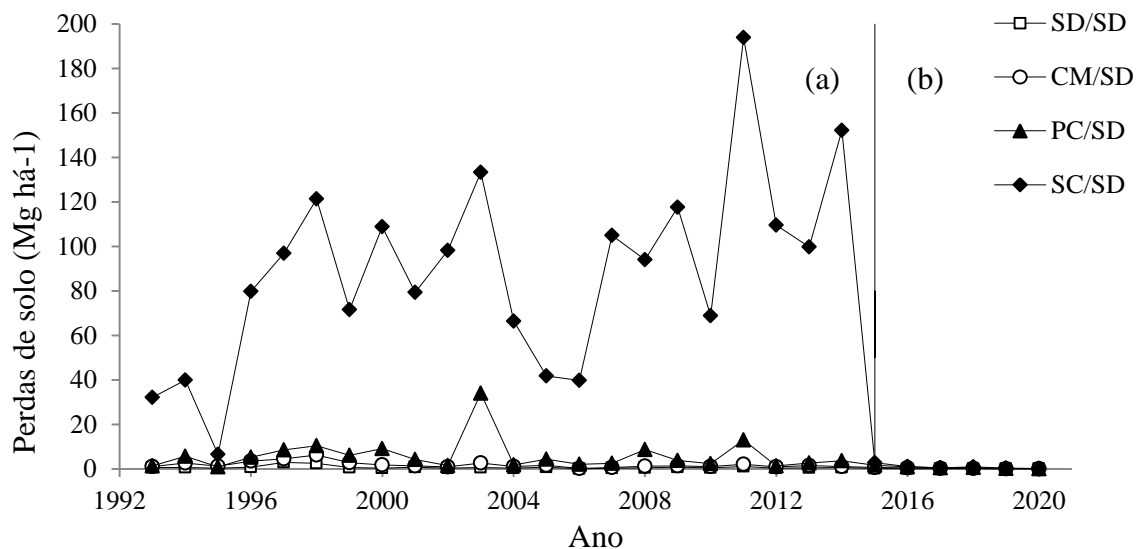
As perdas anuais de solo nos diferentes tratamentos avaliados são apresentadas em uma linha do tempo separada por um eixo, que define as PS antes (Figura 23, lado a) e após a conversão de diferentes sistemas de manejo para SD (Figura 23, lado b). Ao longo dos anos, as PS variaram amplamente entre tratamentos, considerando-se às variações existentes nos padrões de precipitação; intervalo de ocorrência entre chuvas; infiltração de água no solo, que é influenciada pela umidade; estágio de desenvolvimento das culturas, etc (SCHICK, 2014). Este comportamento foi observado por diversos autores (SCHICK et al., 2000; COGO et al., 2003; BEUTLER et al., 2003). Por essa razão, Wischmeier & Smith (1978) recomendam a

condução de experimentos de campo por longos períodos, de forma a obter dados confiáveis em relação ao manejo do solo.

Schick et al. (2014), trabalhando na mesma área experimental com dados provenientes de 20 anos de cultivo, ou seja, antes da conversão de diferentes sistemas de manejo para SD, verificaram perdas médias anuais de solo na ordem de 85,29; 6,41; 2,00 e 0,82 Mg ha⁻¹ para os tratamentos com solo descoberto e sem cultivo, PC, PR e SD, respectivamente. Para estes mesmos tratamentos, convertidos para SD, as PS foram reduzidas para 1,0; 0,7; 0,3 e 0,1 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, demonstrando relativa proporcionalidade entre os trabalhos.

A redução da EHP pode ser atribuída à mínima mobilização do solo, dada à ausência de preparo do solo. Isto promoveu de forma contínua, elevada cobertura do solo, que protegeu a superfície contra a energia cinética do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial, além de promover a manutenção ou melhoria das propriedades físicas do solo. Dissmeyer e Foster (1981) afirmam que esse sistema de manejo promove o aumento da consolidação superficial do solo, o que contribuiu também para a diminuição da EHP.

Figura 23 - Perdas anuais de solo (Mg ha⁻¹) em diferentes tratamentos.

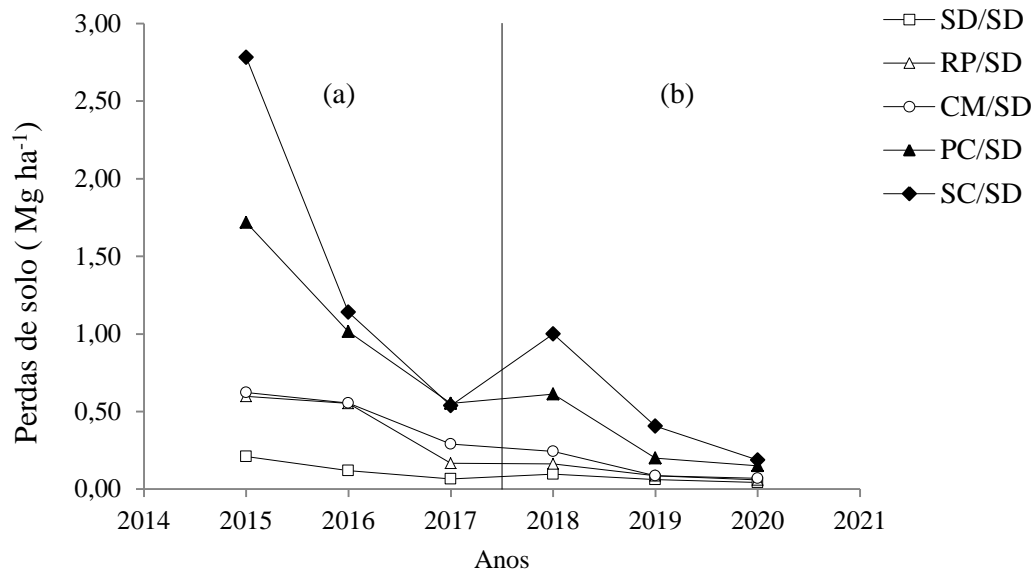


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Schick (2014); Bandeira (2015); Wolschick (2018).

As perdas anuais de solo nos diferentes tratamentos, após a conversão de diferentes sistemas de manejo para SD são apresentadas na Figura 24. As perdas médias anuais de solo entre 2015 e 2017 foram de 0,1; 0,4; 0,5; 1,1 e 1,5 Mg ha⁻¹, respectivamente, para os tratamentos SD/SD, RP/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD (Figura 24, lado a). As perdas médias anuais de solo obtidos nesta pesquisa, entre 2018 e 2020 foram de 0,01; 0,1; 0,13; 0,32 e 0,53 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, para os tratamentos SD/SD, RP/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD

(Figura 24, lado b), portanto, uma redução de 95, 77, 73, 71 e 96%, respectivamente, em relação ao período anterior.

Figura 24 - Perdas anuais de solo (Mg ha^{-1}) em diferentes tratamentos, após conversão de diferentes sistemas de manejo para semeadura direta.

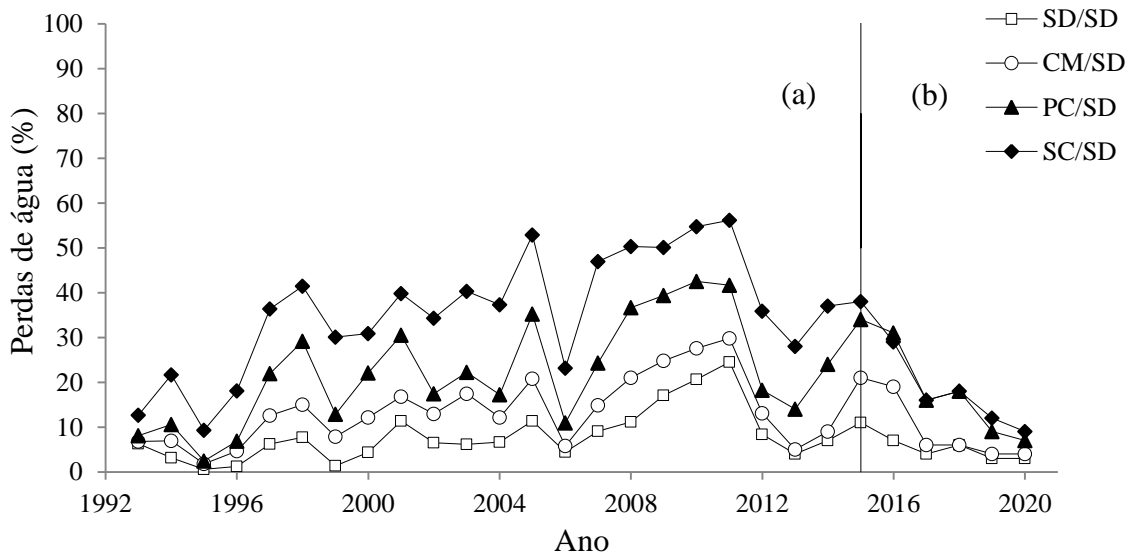


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021 (b). Adaptado de Wolschick (2018) (a).

6.4.2 Perdas de água

As perdas anuais de água (%) nos diferentes tratamentos avaliados são apresentadas em uma linha do tempo separada por um eixo, que define as perdas anuais de água antes (Figura 25, lado a) e após a conversão de diferentes sistemas de manejo para SD (Figura 25, lado b). As mesmas variações entre tratamentos observadas nas PS também foram observadas nas PA (Figura 25). Assim como ocorre com as PS, esse comportamento é explicado pelas oscilações existentes entre os anos em relação aos padrões de precipitação, intervalos de ocorrência entre chuvas, umidade antecedente do solo, diferentes tipos de cultivo, etc.

Com dados provenientes de 20 anos de cultivo (Figura 25, lado a), Schick et al. (2014) observaram que as perdas anuais de água representavam aproximadamente 38 % da precipitação média anual para o tratamento denominado SSC, que era mantido permanentemente descoberto e sem cultivo (parcela padrão da USLE/RUSLE). O intenso preparo realizado neste tratamento, combinado com a ausência de cobertura vegetal favoreceu a desagregação do solo. O selamento superficial também foi favorecido e proporcionou a diminuição da infiltração de água no solo e consequente aumento no volume e velocidade do escoamento superficial.

Figura 25 - Perdas médias anuais de água (%) em diferentes tratamentos.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Adaptado de Schick (2014); Bandeira (2015); Wolschick (2018).

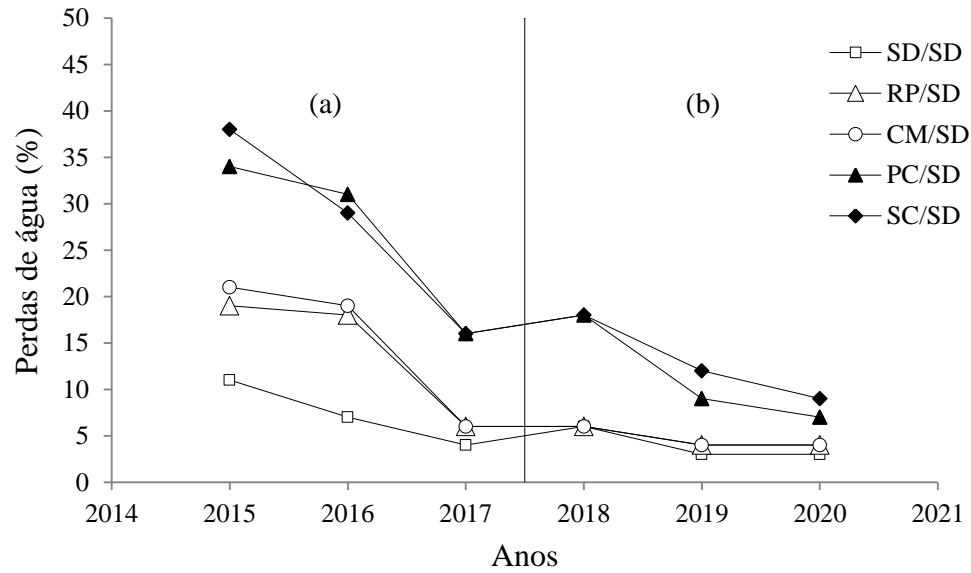
A perda média anual de água no tratamento PC era de 24 % em relação precipitação média anual. Mesmo com intenso preparo realizado neste tratamento, os cultivos presentes proporcionaram maior proteção ao solo, em relação ao impacto das gotas de chuva e o escoamento superficial. Na média dos anos avaliados os tratamentos CM e SD, caracterizados pela pouca ou mínima mobilização do solo e pela presença de elevada quantidade de cobertura do solo, apresentaram as menores perdas média anuais de água, com 15 e 9%, respectivamente, em relação à precipitação média anual (SCHICK et al., 2014)

Quando avaliadas seis anos após a conversão de manejos inserindo-se a SD (SD/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD) as perdas médias anuais de água foram reduzidas para 20, 19, 10 e 6 % da precipitação média anual (Figura 26, lado b). Esse comportamento é explicado pela manutenção da capacidade de infiltração de água, promovida pela menor desagregação do solo, quando da diminuição da intensidade de preparo, bem como pela proteção do solo do impacto das gotas de chuva e escoamento superficial, promovido pela cobertura vegetal presente igualmente em todos os tratamentos.

As perdas médias anuais de água (%) nos diferentes tratamentos, após conversão de manejos para SD são apresentadas na Figura 26. Os resultados de perdas médias anuais de água obtidos nesta pesquisa, referentes aos ciclos de cultivo dos anos de 2018, 2019 e 2020 foram de 5, 6, 7, 12 e 15% em relação à precipitação média anual, respectivamente para os tratamentos SD/SD, RP/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD (Figura 26, lado b). Quando confrontados com os resultados da pesquisa anterior, referentes aos anos de 2015, 2016 e 2017, as perdas anuais de água foram de 7, 15, 16, 30 e 29% em relação à precipitação média anual (WOLSCHICK, 2018), respectivamente para os mesmos tratamentos (Figura 26, lado

a). A redução da densidade do solo, o aumento da porosidade total, especialmente dos macroporos em todos os tratamentos pode ser a explicação para este comportamento, que influenciou a infiltração de água no solo.

Figura 26 - Perdas médias anuais de água (%) em diferentes tratamentos, após conversão de manejos para semeadura direta.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021 (b). Adaptado de Wolschick (2018) (a).

7 CONCLUSÕES

As propriedades físicas do solo melhoram quando avaliadas entre o quarto e o sexto ano após a conversão de diferentes sistemas de manejo, inserindo-se a SD (SD/SD, RP/SD, CM/SD, PC/SD e SC/SD), com a redução da densidade do solo e aumento da macroporosidade e porosidade total em todos os tratamentos, em relação ao primeiro e terceiro ano de conversão à SD.

Em relação às propriedades químicas, em todos os tratamentos, apenas o teor de Mg foi superior em relação aos anos anteriores. Os teores de P, K, Ca e o pH em água, diminuíram em relação aos três e seis anos anteriores.

Com a utilização de plantas de cobertura no inverno (cultivo consorciado de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro) e milho no verão, a SD foi capaz de promover incrementos no estoque de COT no solo na camada superficial, de 0 – 2,5 cm, em relação aos três e seis anos anteriores, com efeito positivo no DMP de agregados do solo.

Entre o quarto e o sexto ano após a conversão de diferentes sistemas de manejo para SD, a produtividade de milho e a massa seca dos cultivos de inverno não aumentaram em relação aos ciclos de cultivo anteriores a esta pesquisa.

A consolidação do solo contribuiu para a diminuição da EHP em todos os tratamentos, entre o quarto e sexto ano após a conversão de diferentes sistemas de manejo para SD, principalmente do PC para a SD e do SC para a SD, quando confrontados com os resultados da pesquisa anterior, com efeito maior nas PS do que nas PA.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A velocidade de recuperação de um solo degradado pela EHP em manejos não conservacionistas varia conforme o estado de degradação em que o solo se encontra no momento da modificação de manejo para a condição conservacionista de SD.

A degradação do solo pela EHP, afeta negativamente o rendimento das culturas, demandando tempo, custo e esforço para sua recuperação. Por isso, torna-se necessário a condução de pesquisas com enfoque na conversão de diferentes sistemas de manejo à SD e sua evolução temporal.

Este trabalho serve de referência para recuperação de áreas degradadas pela EHP, com a inserção do sistema SD. Ademais, ações complementares como rotação de culturas, cultivo em faixas e em contorno em relação a pendente do terreno, terraceamento agrícola, alocação de estradas dentro e fora das áreas agrícolas e práticas edáficas de conservação do solo, são necessárias para inserção de áreas degradadas pela EHP no processo produtivo.

REFERÊNCIAS

- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 601-612, 2003.
- ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre erodibilidade entressulcos e estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p.141-151, 2000.
- ALBUQUERQUE, A. W. D.; M FILHO, G.; SANTOS, J. R.; COSTA, J. P.; SOUZA, J. L. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 153-160, 2005.
- ALCÂNTARA, F. A. D.; FURTINI NETO, A. E.; PAULA, M. B. D.; MESQUITA, H. A. D.; MUNIZ, J. A. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 277-288, 2000.
- ALVARENGA, M. I. N.; DAVIDE, A. C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 933-942, 1999.
- AMARAL, A. J. D.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; BARBOSA, F. T. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um Cambissolo Húmico da região do Planalto Sul-Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2145-2155, 2008.
- ANDRADE, A. P. **Atributos físicos e químicos de um Cambissolo Húmico sob dois sistemas de manejo após doze anos de cultivo**. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, 2009. 68p. (Dissertação de Mestrado)
- ANDRADE, A. P.; MAFRA, Á. L.; BALDO, G. R.; PICCOLLA, C. D.; BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A. Physical properties of a humic cambisol under tillage and cropping systems after twelve years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 219-226, 2010.
- ANDRADE, A. P.; MAFRA, Á. L.; PICCOLLA, C. D.; ALBUQUERQUE, J. A.; BERTOL, I. Atributos químicos de um Cambissolo Húmico após 12 anos sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 5, p. 814-821, 2012.
- BAGARELLO, V.; FERRO, V. Analysis of soil loss data from plots of differing length for the Sparacia experimental area, Sicily, Italy. **Biosystems Engineering**, v. 105, n. 3, p. 411-422, 2010.
- BANDEIRA, D. H. **Sistemas de manejo do solo sob aplicação de dejetos líquidos de suínos: propriedades físicas e químicas do solo e erosão hídrica**. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, 2015. 138 p. (Dissertação de Mestrado).
- BARBOSA, F.; BERTOL, I.; WERNER, R.S.; RAMOS, J.C.; RAMOS, R.R. Comprimento crítico de declive relacionado à erosão hídrica, em três tipos e doses de resíduos em duas

direções de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1279-1290, 2012.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Soil Water - The Field Moisture Regime. In: **Soil Physics**. 4. ed. Londres: John Willey, cap.10, p. 353-393, 1972.

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo Húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 687-694, 1999.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 105-112, 1997.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 677-683, 2004

BAKKER, M.M.; GOVERS, G.; ROUNSEVELL, M.D.A. The crop productivity- erosion relationship: an analysis based on experimental work. **Catena**, Amsterdam, v.57, p.55-76, 2004.

BEAR, F. E.; TOTH, S. J. Influence of Ca on availability of other soil cations. **Soil Science**, Baltimore, v. 65, n. 1, p. 69-75, 1948.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Relações da erosão hídrica com métodos de preparo do solo, na ausência e na presença de cobertura por resíduo cultural de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, n. 2, p. 187-192, 1987.

BERTOL, I.; MIQUELLUTI, D.J. Perdas de solo, água e nutrientes reduzidas pela cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, p. 1205-1213, 1993.

BERTOL, I. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico distrófico sob diferentes preparos do solo e rotação de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, n. 2, p. 267-271, 1994.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e ausência de resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 409-418, 1997.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 657-668, 2000.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; VISENTIN, D.; COGO, N. P. Erosividade das chuvas e sua distribuição entre 1989 e 1998 no município de Lages (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 455-464, 2002.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.S.; LEITE, D.; AMARAL, A. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, p. 155-163, 2004.

BERTOL, I.; GONZÁLEZ, A. P.; E VÁZQUEZ, E. V. Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduo de milho submetido à chuva simulada. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n.1, p.103-110, jan. 2007a.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J. C.; AMARAL, A. J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 133-142, 2007b.

BERTOL, O. J.; FEY, E.; FAVARETTO, N.; LAVORANTI, O. J.; RIZZI, N. E. Mobilidade de P, Cu e Zn em colunas de solo sob sistema de semeadura direta submetido às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1841-1850, 2010.

BERTOL, I.; GOBBI, E.; BARBOSA, F. T.; PAZ-FERREIRO, J.; GEBLER, L.; RAMOS, J. C.; SOUZA WERNER, R. D. Erosão hídrica em campo nativo sob diversos manejos: perdas de água e solo e de fósforo, potássio e amônio na água de enxurrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1421-1430, 2011.

BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; MAFRA, Á. L.; FLORES, M. C. Soil water erosion under different cultivation systems and different fertilization rates and forms over 10 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1918-1928, 2014.

BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, C.; LUCIANO, R. V. Water infiltration in two cultivated soils in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 573-88, 2015.

BERTOL, I.; CASSOL, E. A.; BARBOSA, F. T. Erosão do solo: fases no processo de erosão eólica. In: BERTOL, I.; CASSOL, E. A.; BARBOSA, F. T. **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. 1. Ed. Viçosa: SBCS, 2019. P. 453-455.

BERTONI, J.; LOMBARDI, N. F. **Conservação do solo**. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999.

BEUTLER, J.F. **Erosão hídrica num Latossolo Vermelho aluminoférrico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo**. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, 2000. 105 p. Dissertação de Mestrado.

BEUTLER, J. F.; BERTOL, I.; VEIGA, M.; WILDNER, L. P. Perdas de solo e água num Latossolo Vermelho Aluminoférrico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 509-517, 2003.

BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; SMITH, M.S.; FRYE, W.W. & CORNELIUS, P.L. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. **Soil and Tillage Research**, v. 3, p. 135-146, 1983.

BURLE, M.L.; MIELNICZUK, J. & FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant Soil**, v.190, p. 309-316, 1997.

CABEDA, M.S.V. **Computation of storms EI30 values**. West Lafayette: Purdue University, 1976. 6p. (não publicado).

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-escuro Distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, p. 121-126, 1995.

CAMPOS, B. C., REINERT, D. J., NICOLODI, R., CASSOL, L. C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 383-391, 1999.

CARVALHO, M.P.; LOMBARDI NETO, F.; VASQUES FILHO, J. CATANEO, A. Erosividade da chuva de Mococa (SP) analisada pelo índice EI₃₀. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 13, p. 243-249, 1989.

CASSOL, E.A.; ELTZ, F. L. F.; MARTINS, D.; LEMOS, A. M. D.; LIMA, V. S. D.; BUENO, A. C. Erosividade, padrões hidrológicos, período de retorno e probabilidade de ocorrência das chuvas em São Borja, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1239-1251, 2008.

CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. D. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v. 30, p. 339-352, 2006.

CASTRO FILHO, C. de.; MUZILLI, Osmar.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

COGO, N.P. Uma contribuição à metodologia de estudo das perdas de erosão em condições de chuva natural. I. Sugestões gerais, medição dos volumes, amostragem e quantificação de solo e água da enxurrada (1ª aproximação). In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 2., Passo Fundo, 1978. **Anais...** Passo Fundo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, p. 75-98. 1978.

COGO, N.P. **Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters**. West Lafayette, Purdue University, 1981. 346p. (Tese de Doutorado)

COGO, N. P.; MOLDENHAUER, W. C.; FOSTER, G. R. Soil loss reductions from conservation tillage practices. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 2, p. 368-373, 1984.

COGO, N.P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R.A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciada por métodos de preparo, classes de declividade e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 743-753, 2003.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1399-1407, 2008.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina / Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. 11 ed. Porto Alegre, 2016.

DEDECEK, R.A.; RESCK, D.V.S.; DE FREITAS JR., E. Perdas de solo água e nutrientes por erosão em Latossolo vermelho escuro nos cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, p. 265-272, 1986.

DEDECEK, R. A. Efeitos das perdas e deposições de camadas de solo na produtividade de um Latossolo Vermelho-Escuro dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, 1987.

DIAS, L. E.; GRIFFITH, J. J. Conceituação e caracterização de áreas degradadas. **Recuperação de áreas degradadas**, v. 1, 1998.

DISSMEYER, G. E.; FOSTER, G. R. Estimating the cover-management factor (C) in the universal soil loss equation for forest conditions. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, n. 4, p. 235-240, 1981.

DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. **Anais**. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.

DUAN, X.; XIE, Y.; OU, T.; LU, H. Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China. **Catena**, V. 87, n. 2, P. 268-275, 2011.

DULEY, F. L. Surface Factors Affecting the Rate of Intake of Water by Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 4, n. C, p. 60-64, 1940.

ELLISON, W. D. Studies of raindrop erosion. **Agricultural Engineering**, v. 25, n. 4, p. 131-136, 1947.

ELTZ, F. L. F.; COGO, N. P.; MIELNICZUK, J. Perdas por erosão em diferentes manejos de solo e coberturas vegetais em solo Laterítico Bruno avermelhado distrófico (São Jerônimo). I. Resultados do primeiro ano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, n. 2-3, p. 123-127, 1977.

ELTZ, F. L. F.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, n. 2, p. 259-267, 1989.

ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A.; PASCOTINI, P. B. Potencial erosivo e características das chuvas de Encruzilhada do Sul, RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 331-337, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 2017, 212p.

FAO. **Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management**. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Rome. 2019. 100 pp.

- FENTON, T. E, KAZEMI M, LAUTERBACH-BARRETT M A. Erosional impact on organic matter content and productivity of selected Iowa soils. **Soil Tillage Res**, 2005, 81(2): 163–171.
- FONTANELI, R. S.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos. Leguminosas Forrageiras Perenes de Inverno. In: FONTANELI, R. S.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos. Forrageiras para Integração Lavoura Pecuária Floresta na Região Sul-Brasileira. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012. Cap. 11. p. 321-334.
- FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981.
- FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In.: BASSELMAN, J.A., ed. **Hydrologic modeling of small watersheds**, p. 297-300, 1982.
- FRYE, W.W.; BENNEIT, O.L. & BUNTLEY, G.J. Restoration of crop productivity on eroded or degraded soils. In: FOLLEIT, R.F. & STEWART, B.A., ed. **Soil erosion and crop productivity**, ASA, Madison, p.335-356, 1985.
- GAERTNER, C.; BISCAIA, R.M. & DEDECEK, R.A. Produtividade de trigo e soja em Latossolo Vermelho distrófico sob erosão simulada e causada pela chuva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 1443-1449, 2003.
- GAERTNER, C.; DEDECEK, R. A.; BISCAIA, R. M. Produtividade do trigo e da soja em Latossolo Vermelho distrófico com diferentes níveis de erosão hídrica. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 7, n. 27-34, p. 9-14, 2006.
- GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; CHIAPINOTTO, I. C.; HÜBNER A. P.; MARQUES, M. S.; CADORE, F. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto. II- Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 751-762, 2004.
- GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W. J. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologia e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1985. p. 129-163.
- GUADAGNIN, J.C. **Perdas de nutrientes e carbono orgânico pela erosão hídrica, em um Cambissolo Húmico Alumínico léptico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo**. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, 2003. 150p. (Dissertação de Mestrado).
- GUADAGNIN, J.C.; BERTOL, I.; CASSOL, P.C.; AMARAL, A.J. do. Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p.277-286, 2005.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and tillage research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.
- HERNANI, L.C. et al. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 667-676, 1997.

- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic, 1980. 413 p.
- HUDSON, N.W. Soil conservation. 2.ed. Ithaca, Cornell University Press, 1971. 320p.
- HUDSON, N.W. Soil conservation. 3.ed. Ithaca, Cornell University Press, 1995. 392p.
- IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- JESUS FILHO, J.D. **Manejo de solos de encostas basálticas e suas relações com a erosão hídrica**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987. 93p. (Dissertação de Mestrado)
- KAMINSKI, J. Acidez do solo e a fisiologia das plantas. In: KAMINSKI, J.; VOLKWEISS, J. & BECKER, F.C. SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, 2., Santa Maria, 1989. Seminário... Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1989. p. 39-61.
- KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. **Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling**, v. 9, p. 499-510, 1965.
- KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Influência do manejo do solo na infiltração de água. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 13, n. 5, p. 3915-3925, 2014.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3.ed. Passo Fundo: EDIUPF. 2014. 263p.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relação solo planta**. Agronômica Ceres, 1979.
- LANZANOVA, M. E.; ELTZ, F. L. F.; NICOLOSO, R. D. S.; CASSOL, E. A.; BERTOL, I.; AMADO, T. J. C.; GIRARDELLO, V. C. Residual effect of soil tillage on water erosion from a Typic Paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1689-1698, 2013.
- LEITE, D.; BERTOL, I.; GUADAGNIN, J.C.; SANTOS, E.J. & RITTER, S.R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. I - Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 1033-1044, 2004.
- LIBARDI P. L. Infiltração de água no solo. In: Libardi P. L, editor. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: 1995. p. 313-55.
- LOPES, P.R.C.; CASSOL, E.A. & COGO, N.P. Influência da cobertura vegetal morta na redução da velocidade de enxurrada e na distribuição de tamanho de sedimentos transportados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.11, p. 193-197, 1987.
- LOPES, P. R. C.; COGO, N. P.; CASSOL, E. A. Influencia da cobertura vegetal morta na redução da velocidade da enxurrada e na distribuição de tamanho dos sedimentos transportados. **Embrapa Semiárido-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 1987.

LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; VAZQUEZ, E. V.; FABIAN, E. L. Perdas de água e solo por erosão hídrica em duas direções de semeadura de aveia e ervilhaca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 669-676, 2009.

LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; KURTZ, C.; FAYAD, J. A. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háptico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 9, n. 1, p. 09-19, 2010.

MAZURANA, J.; CASSOL, E. A.; ELTZ, F. L.; BUENO, A. C. Erosividade, padrões hidrológicos e período de retorno das chuvas erosivas de Santa Rosa (RS). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 975-983, 2009.

MARGOLIS, E.; SILVA, A.B.; JACQUES, F.O. Determinação dos fatores da Equação Universal de Perda de Solo para as condições de Caruaru (PE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, p. 165-169, 1985.

MARQUES, J.J.G.S.M.; ALVARENGA, R.C.; CURI, N. Erosividade das chuvas na Região de Sete Lagoas, MG. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 33, p. 761-768, 1998.

MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; NIKOLOV, S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. **Transactions of the ASAE**, v. 18, n. 5, p. 905-911, 1975.

MELLONI, R.; MELLONI E.G.P.; ALVARENGA, M. I. N. Indicadores da qualidade do solo. **Informe Agropecuário**, v. 29: p. 17-29, 2008.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo - ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Genesis, 1999. p.1-8.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica chimica acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.

OLIVEIRA, Jr. R. C; MEDINA, B.F. A erosividade das chuvas em Manaus (AM). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, p. 235-239, 1990.

ORLANDO FILHO, J.; BITTENCOURT, V.C.; CARMELLO, Q.A.C.; BEAUCLAIR, E.G.F. Relações K, Ca e Mg de solo Areia Quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. **Stab, Açúcar Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 14, n. 5, p. 13-17, 1996.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUES, D.B.B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1777-1785, 2011.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

PITOL, C.; SALTON, J.C. **Nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. var. *oleiferus* Metzger): opção para cobertura do solo**. Maracaju: Fundação MS para Pesquisa e Difusão de Tecnologias Agropecuárias, 1993.

POTE, D. H., DANIEL, T. C., MOORE JR, P. A., NICHOLS, D. J., SHARPLEY, A. N., & EDWARDS, D. R. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 3, p. 855-859, 1996.

PRAZERES, M.S.; BARBOSA, F.T.; BERTOL, I.; FEHLAUER, T.V. Scarification in no-tillage: soil physics and plant development. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 19, n. 2, p. 151-160, 2020.

RENARD, K.G. et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Washington: USDA, 1997. (**Agricultural Handbook, 8**).

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 1931-1935, 2006.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, 27: 29-48, 2003.

REICOSKY, D. C.; KEMPER, W. D.; LANGDALE, G.; DOUGLAS, C. L.; RASMUSSEN, P. E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. **Journal of soil and water conservation**, v. 50, n. 3, p. 253-261, 1995.

RIBEIRO, M. R.; GALINDO, I, C, L.; JACOMINE, P, K, T.; RIBEIRO FILHO, M. R. Classes de solos como determinantes do uso, do manejo e da conservação do solo e da água: princípios. *In*: RIBEIRO, M. R.; GALINDO, I, C, L.; JACOMINE, P, K, T.; RIBEIRO FILHO, M. R. **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. 1. Ed. Viçosa: SBCS, 2019. P. 123-160.

ROSOLEM, C. A.; SANTOS, F. P. D.; FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1033-1040, 2006.

RUSSEL, E.W. **Soil conditions and plant growth**. 10 ed. Londres, Longman, 1973. 849p. Ilust.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 353 p

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JÚNIOR, A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 427-436, 2000.

SCHICK, J. **Fatores r e k da usle e perdas de solo e água em sistemas de manejo sobre um Cambissolo Húmico em Lages, SC**. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2014. 149p. (Tese de Doutorado).

SCHICK, J.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erodibilidade de um Cambissolo Húmico sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1906-1917, 2014a.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erosividade das chuvas de Lages, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1890-1905, 2014b.

SCHWARZ, R.A. **Perdas por erosão hídrica em diferentes classes de declividade, sistemas de preparo e níveis de fertilidade do solo na região das Missões - RS**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. 130p. (Dissertação de Mestrado)

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, Jeffrey E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, v. 164, n. 4, p. 224-234, 1999.

SILVA, I.F.; ANDRADE, A.P.; CAMPOS FILHO, O.R. & OLIVEIRA, F.A.P. Efeito de diferentes coberturas e de práticas conservacionistas no controle da erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, p. 289-292, 1986.

SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; STRIEDER, M.L.; SILVA, A.A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p.1011-1020, 2006.

SILVA, A. A. D.; SILVA, P. R. F. D.; SUHRE, E.; ARGENTA, G.; STRIEDER, M. L.; RAMBO, L. (2007). Sistemas de coberturas de solo no inverno e seus efeitos sobre o rendimento de grãos do milho em sucessão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 928-935, 2007.

SOBRINHO, T. A., VITORINO, A. C., DE SOUZA, L. C., GONÇALVES, M. C., & CARVALHO, D. F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, p. 191-196, 2003.

SOIL CONSERVATION SOCIETY OF AMERICA – SCSA. Resource conservation glossary. 3rd. Ed. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1992.

SOUZA, V. F. C.; BERTOL, I.; E WOLSCHICK, N. H. Effects of Soil Management Practices on Water Erosion under Natural Rainfall Conditions on a Humic Dystrudept. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, e0160443, 2017.

SPAVOREK, G.; TERAMOTO, E. R.; TORET, D. M.; ROCHELE, T. C. P. Erosão simulada e a produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 363-368, 1991.

STRECK, E.V. **Erosão hídrica do solo relacionada com o subfator uso anterior da terra do modelo “RUSLE”**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 195p. (Tese de Doutorado)

STRECK, E. V.; COGO, N. P. Reconsolidação da superfície do solo após a descontinuidade do plantio direto, com e sem cultivo, relacionada à erosão e sua predição com RUSLE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p.141-151, 2003.

TEDESCO, M.J.; **Análises de solo, plantas e outros materiais**. ed. 2, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995,174p.

TEIXEIRA, L.A.J.; TESTA, V.M. & MIELNICZUK, J. Nitrogênio do solo, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 207-214, 1994.

VAL, L. A.; BAHIA, V. G.; FREIRE, J. C.; DIAS JÚNIOR, M. S. Erosividade das chuvas em Lavras, MG. **Ciência e Prática**, v.10, n.2, p.199-209, 1986.

VELOSO, C. A. C., BORGES, A. L., MUNIZ, A. S., & VEIGAS, I. D. J. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 49, n. 1, p. 123-128, 1992.

VOLK, L.B.S. **Erosão hídrica relacionada às condições físicas de superfície e subsuperfície do solo, induzidas por formas de cultivo e de manejo dos resíduos culturais**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 146p. (Tese de Mestrado)

VOLK, L.B.S.; COGO, N.P.; STRECK, E.V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo, resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. R **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 763-774, 2004.

VOLK, L.B.S. **Condições físicas da camada superficial do solo resultante do seu manejo e identificadores de qualidade para redução da erosão hídrica pluvial e do escoamento superficial**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 68p. (Tese de Doutorado)

WANG, Z.; LIU, B., WANG, X., GAO, X., & LIU, G. Erosion effect on the productivity of black soil in Northeast China. **Science in China Series D: Earth Sciences**, v. 52, n. 7, p. 1005-1021, 2009.

WATANABE, R. T.; FIORETTO, R. A.; DA FONSECA, I. B.; SEIFERT, A. L.; SANTIAGO, D. C.; CRESTE, J. E.; HARADA, A.; CUCOLOTTI, M. Produtividade da cultura da soja em função da densidade populacional e da porcentagem de cátions (Ca, Mg e K) no complexo sortivo do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 4, p. 477-484, 2005.

WALTRICK, P. C.; MACHADO, M. A. M.; DIECKOW, J.; OLIVEIRA, D. 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**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 256-267, 2015.

WERNER, D. **Production and biological nitrogen fixation of tropical legumes**. In: WERNER, D.; NEWTON, W.E. (Eds.). Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology and the environment. Dordrecht: Springer, 2005. p.1-13

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, Walter H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 3, p. 246-249, 1959.

WISCHMEIER, Walter H.; MANNERING, J. V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society of America Journal**, v. 33, n. 1, p. 131-137, 1969.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington, USDA, 1978. 58p. (**Agriculture Handbook, 537**).

WOLSCHICK, N. H. et al. Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 15, n. 2, p. 134-143, 2016.

WOLSCHICK, N. H.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; SANTOS, K. F. dos; MUZEKA, L. M. Plantas de cobertura do solo e seus efeitos na produtividade de milho e soja. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 19, n. 2, apr./jun., p. 151-160, 2020.

WOLSCHICK, N.H. **Reflexos na erosão hídrica e nos atributos físicos e químicos de um Cambissolo Húmico após a conversão de sistemas de manejo para a semeadura direta**. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018. 138p. (Tese de Doutorado).

XU, X.; NIEBER, J.L.; GUPTA, S. C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 6, p. 1743-1750, 1992.