

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC

CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ANA KARINA VEIGA BECKERT**

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO, ESTOQUES E FRACIONAMENTO DE CARBONO  
ORGÂNICO EM SISTEMAS REGENERATIVOS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM  
COMPARAÇÃO A ÁREAS NATIVAS**

**LAGES, SC, 2023**

**ANA KARINA VEIGA BECKERT**

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO, ESTOQUES E FRACIONAMENTO DE  
CARBONO ORGÂNICO EM SISTEMAS REGENERATIVOS DE PRODUÇÃO DE  
GRÃOS EM COMPARAÇÃO A ÁREAS NATIVAS**

Dissertação apresentada como requisito para  
obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo ao  
Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo  
do Centro de Ciências Agroveterinárias, da  
Universidade do Estado de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Álvaro Luiz Mafra

Coorientadores: Jackson Adriano Albuquerque  
Paulo Cezar Cassol

**LAGES, SANTA CATARINA, 2023**

## Ficha Catalográfica:

Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Universitária Udesc,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Beckert, Ana Karina Veiga

Atributos físicos do solo, estoques e fracionamento de carbono orgânico em sistemas regenerativos de produção de grãos em comparação a áreas nativas / Ana Karina Veiga Beckert. -- 2023. 47 p.

Orientador: Álvaro Luiz Mafra

Coorientador: Jackson Adriano Albuquerque

Coorientador: Paulo Cezar Cassol

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2023.

1. Qualidade do solo. 2. Resistência à Penetração. 3. Estabilidade dos Agregados. I. Mafra, Álvaro Luiz. II. Albuquerque, Jackson Adriano. Cassol, Paulo Cezar. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

**ANA KARINA VEIGA BECKERT**

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO, ESTOQUES E FRACIONAMENTO DE  
CARBONO ORGÂNICO EM SISTEMAS REGENERATIVOS DE PRODUÇÃO DE  
GRÃOS EM COMPARAÇÃO A ÁREAS NATIVAS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestrado em Ciência do Solo ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina.

**BANCA EXAMINADORA**

**Membros:**

**ÁLVARO LUIZ MAFRA** em 18/09/2023 às 21:32:40

Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:43:41 e válido até 30/03/2118 - 12:43:41.  
(Assinatura do sistema)

---

**Dr. Álvaro Luiz Mafra – Orientador UDESC**



Documento assinado digitalmente

**Arcangelo Loss**

Data: 18/09/2023 20:01:43-0300

CPF: \*\*\*.005.567-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

**Dr. Arcangelo Loss – UFSC**

**NEURO HILTON WOLSCHICK** (CPF: 030.XXX.699-XX) em 18/09/2023 às 22:12:19

Emitido por: "SGP-e", emitido em 08/02/2023 - 16:10:56 e válido até 08/02/2123 - 16:10:56.  
(Assinatura do sistema)

---

**Dr. Neuro Hilton Wolschick – UDESC**

**Lages, 21 de julho de 2023**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço, ao meu grande mestre e orientador, Prof. Álvaro Luiz Mafra, pela coragem, pela paciência e disponibilidade do seu tempo em me acompanhar e orientar cuidadosamente durante todo este tempo do mestrado, por todo o apoio durante essa trajetória.

À minha ex-aluna no Ensino Fundamental e Médio da EEB José Martins – Bom Jardim da Serra, e hoje uma grande amiga e fiel companheira, Schayanne Matos Henrique, foi ela que me ajudou a dar os primeiros passos na vida de mestranda e a partir daqui novos frutos foram colhidos, profissionais e pessoais.

Aos amigos Jessica Faversani, Gabriel Mancini e Iasmim Nunes pelo apoio e suporte nas madrugadas.

Agradeço imensamente aos meus pais Antônio Veiga Beckert e Glória Maria Da Col Beckert in *memoriam*, que mesmo longe dos meus olhos foi possível senti-los em que cada momento dessa trajetória, foi deles o incentivo e a coragem para nunca desistir.

A todos os meus familiares: sobrinhos, sobrinhas, cunhadas, cunhados, sogra, sogro em especial aos meus irmãos, Luís Antônio Veiga Beckert, Rita Maria Veiga Beckert Schmitt, Paulo Tomaz Beckert e Juditt Aparecida Beckert, que me apoiaram e deram grande contribuição para que o sonho de cursar mestrado tornasse realidade.

Aos meus co-orientadores, Prof. Jackson Adriano Albuquerque e Paulo Cezar Cassol, pelo apoio, pela paciência e disponibilidade do seu tempo em me ajudar durante este período de mestrado.

À minha magnífica equipe de pesquisa **Saúde do Solo**, por tudo que aprendi e vivi com vocês: Juliano Muniz da Silva dos Santos, Gregory Kruker, Genicelli Mafra e Nelito Nhanca, sem o esforço, a dedicação, união de vocês nada seria possível realizar, meus apoios operacionais e sem dúvidas intelectuais. Palavras não serão suficientes para descrever todo o meu carinho, amor e respeito por vocês.

À minha filha do coração, que esteve presente em todos os momentos, teve participação ativa em todas as etapas dessa minha caminhada, foram alguns finais de semana e algumas noites em que ela não mediu esforços para estar ao meu lado. A você, Tamires Manoel Matias, toda a minha gratidão, que você seja abençoada e guiada pelos anjos de luz em todas as suas escolhas.

Aos agricultores, que me oportunizaram e me deram suporte para o desenvolvimento dessa pesquisa, meu Muito Obrigada aos senhores: Dionísio Filipini (Zortea/SC), Sérgio Bento (Campos Novos/SC), Pablo Baldin (Vacaria/RS).

À Secretaria de Educação do Estado de Santa Catarina, por me conceder afastamento de forma remunerada permitindo uma dedicação exclusiva aos meus estudos.

Ao meu esposo, Boaventura Velho Padilha, por toda paciência, durante esses dois anos de atividade.

À UDESC-CAV, seu corpo docente, direção e administração que me deram oportunidade para esta conquista e aos demais funcionários e terceirizados.

A todos os professores e professoras de CAV-PPGCS que me fizeram tornar uma mulher (mestre).

Aos meus amigos e todos os integrantes do laboratório de Física e Manejo do Solo, pela acolhida e aos demais colegas que conheci e compartilhei conhecimentos durante esta trajetória. Nomeá-los, será impossível, foram muitos que marcaram a minha vida.

## **Mensagem**

**Que possamos ter sucesso na arte de manejar os recursos naturais com respeito e sabedoria, sem perder a conexão com a natureza e entregar para as próximas gerações algo melhor do que recebemos! (Antonio Teixeira 2023 p. 18).**

**Beckert, Ana Karina Veiga. Atributos físicos do solo, estoques e fracionamento de carbono orgânico em sistemas regenerativos de produção de grãos em comparação a áreas nativas.** 2023. 45 f. Dissertação de mestrado em Ciência do Solo – Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, SC, 2023.

## RESUMO

Compreender e quantificar os impactos do uso e manejo do solo é a base para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. Diante disso, objetivou-se avaliar, determinar e correlacionar os atributos físicos porosidade, densidade, estabilidade de agregados, resistência à penetração mecânica e infiltração de água com as concentrações das frações do carbono orgânico e apontar a sua conexão de qualidade e saúde do solo, em solos classificados como Latossolo, submetidos a tempos (30, 6 e 4 anos) em sistemas regenerativos de manejo (SRM) tendo como referência áreas de mata nativa. O presente estudo foi conduzido em áreas de cultivo comercial de grãos de base regenerativa e em áreas de mata nativa (MN) adjacente, nos municípios de Campos Novos, Zortéa, em Santa Catarina e Vacaria, no Rio Grande do Sul. Foram utilizados para análises dos resultados o teste de normalidade por Kolgomorov-Smirnov e comparação de médias por Tukey ambos com 5% de significâncias e correlação de Pearson para avaliar a relação existente entre atributos físicos e carbono orgânico total. Os atributos físicos do solo de forma geral, não apresentaram limitação para o desenvolvimento das plantas. A densidade encontra-se dentro do limite crítico aceitado para o tipo de solo (argiloso) entre  $1,40 \text{ g cm}^{-3}$  e  $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ . A porosidade apresentou melhores resultados nas áreas de mata nativa, porém não foi limitante nas áreas de cultivo, mantendo a capacidade de drenagem, retenção e aeração do solo. A resistência à penetração, em todas as áreas, está abaixo do limite crítico para o desenvolvimento do sistema radicular, uma vez que os valores não ultrapassaram os 2000 kPa, assim como os demais atributos, não indicaram limitação para o desenvolvimento das plantas. A estabilidade dos agregados não apresentou relação significativa com o carbono orgânico. A área com maior tempo de adoção do manejo (SRM30) apresenta estoques de carbono semelhantes à MN, variando de  $28,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  na camada 0 a 5 cm a  $22,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  na camada 10 a 20 cm. A área SRM6 foi semelhante à mata nativa para carbono associado aos minerais com valores de 24,8 e  $25,9 \text{ g kg}^{-1}$  na última camada, e apresentou diferença nas camadas superficiais. Os teores de carbono orgânico particulado (COP) na SRM30 e MN30 foram semelhantes, com valores de 9,0; 10,0; 8,8 e 9,0; 9,2;  $9,2 \text{ g kg}^{-1}$ , nas três camadas respectivamente; para carbono orgânico associado aos minerais (COAM), os valores foram de 42,0; 37,7; 29,4 e 59,0; 37,7 e  $29,4 \text{ g kg}^{-1}$ , nas três camadas, respectivamente. Para as áreas SRM6 e MN6, os teores de COP foram 11,0; 7,1; 4,6 e 20,5; 16,9;  $15,0 \text{ g kg}^{-1}$ , nas três camadas, respectivamente. Nas áreas SRM4 e MN4, os teores de COP foram 3,2; 4,1; 1,7 e 20,4; 10,0;  $9,3 \text{ g kg}^{-1}$ , nas três camadas, respectivamente. Diante disso, conclui-se que o sistema regenerativo com 30 anos apresenta estoque de carbono no solo semelhante a mata nativa.

**Palavras-chaves:** Qualidade do solo, Resistência à Penetração, Estabilidade dos Agregados



**Beckert, Ana Karina Veiga Beckert. Soil physical properties, organic carbon stocks and fractionation in regenerative grain production systems compared to native areas. 2023.** 45 p. Master's dissertation in Soil Science – Santa Catarina State University – UDESC, Center for Agroveterinary Sciences – CAV. Graduate Program in Soil Science, Lages, SC, 2023.

### **ABSTRACT**

Understanding and quantifying the impacts of soil use and management is the basis for the development of sustainable agricultural systems. In view of this, the objective was to evaluate, determine and correlate soil physical properties porosity, density, aggregate stability, resistance to mechanical penetration and water infiltration with the concentrations of organic carbon fractions and to point out their connection to soil quality and health, in soils classified as Oxisol, submitted to times (30, 6 and 4 years) in regenerative management systems (SRM) with reference to native forest areas. The present study was carried out in areas of commercial cultivation of regenerative grains and adjacent native forest (MN) areas, in the municipalities of Campos Novos, Zortéa, in Santa Catarina and Vacaria, in Rio Grande do Sul. Results were tested by the Kolgomorov-Smirnov normality test and comparison of means by Tukey, both with 5% of significance and Pearson's correlation to evaluate the relationship between physical properties and total organic carbon. The physical properties of the soil, in general, did not limit crop development. Soil density is within the critical limit accepted for the type of soil (clay) between  $1.40 \text{ g cm}^{-3}$  and  $1.50 \text{ g cm}^{-3}$ . Porosity showed better results in native forest areas, but did not limit in cultivated areas, maintaining the drainage capacity, retention and soil aeration. The resistance to penetration, in all areas, is below the critical limit for the development of the root system, since the values did not exceed 2000 kPa, as well as the other properties, did not indicate a limitation for the development of the plants. Aggregate stability showed no significant relationship with organic carbon. The area with the longest time of management use (SRM30) presents carbon stocks similar to the MN, ranging from  $28.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  in the 0 to 5 cm layer to  $22.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  in the 10 to 20 cm layer. The SRM6 area was similar to the native forest for carbon associated with minerals with values of 24.8 and  $25.9 \text{ g kg}^{-1}$  in the last layer, and showed difference in the superficial layers. Particulate organic carbon (COP) contents in SRM30 and MN30 were similar, with values of 9.0; 10.0; 8.8 and 9.0; 9.2;  $9.2 \text{ g kg}^{-1}$ , in the three layers respectively; for mineral-associated organic carbon (COAM), the values were 42.0; 37.7; 29.4 and 59.0; 37.7 and  $29.4 \text{ g kg}^{-1}$ , in the three layers, respectively. For the SRM6 and MN6 areas, the COP contents were 11.0; 7.1; 4.6 and 20.5; 16.9;  $15.0 \text{ g kg}^{-1}$ , in the three layers, respectively. In the SRM4 and MN4 areas, the COP contents were 3.2; 4.1; 1.7 and 20.4; 10.0;  $9.3 \text{ g kg}^{-1}$ , in the three layers, respectively. In view of this, it is concluded that the 30-year-old regenerative system has values of carbon stock in the soil similar to the values found in the native forest.

**Keywords:** Soil Quality, Penetration Resistance, Aggregate Stability

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Objetivos e princípios da agricultura regenerativa .....	20
Figura 2- Áreas utilizadas para o estudo .....	25
Figura 3 - Mapa da região sul do Brasil e das áreas em estudo.....	26
Figura 4 - Grade amostral.....	27
Figura 5 - Resultado da análise de coeficiente de correlação Pearson entre os atributos físicos do solo, estoques de carbono, carbono orgânico total, e as frações granulométricas do carbono entre as camadas de 0 - 5 cm. ....	34
Figura 6 - Resultado da análise de matriz de correlação entre os atributos físicos do solo, estoques de carbono, carbono orgânico total, e as frações granulométricas do carbono entre as camadas de 5 – 10 cm entre as áreas em estudo. ....	34

## LISTA DE ABREVIACOES

<b>AR</b>	Agricultura regenerativa
<b>BIO</b>	Bioporos
<b>C</b>	Carbono
<b>COAM</b>	Carbono orgânico associados aos minerais
<b>COP</b>	Carbono orgânico particulado
<b>COTa</b>	Carbono orgânico total dos agregados
<b>COT</b>	Carbono orgânico total
<b>DMP</b>	Diâmetro médio ponderado
<b>DS</b>	Densidade do solo
<b>EA</b>	Estabilidade de agregados
<b>ECO</b>	Estoques de carbono orgânico
<b>MN</b>	Mata nativa
<b>MACR</b>	Macroporosidade do solo
<b>MICR</b>	Microporosidade do solo
<b>MN30</b>	Mata nativa adjacente à lavoura de 30 anos
<b>MN6</b>	Mata nativa adjacente à lavoura de 6 anos
<b>MN4</b>	Mata nativa adjacente à lavoura de 4 anos
<b>MOS</b>	Matéria orgânica do solo
<b>MUT</b>	Mudanças do uso da terra
<b>PT</b>	Porosidade do solo
<b>SPC</b>	Sistema de plantio convencional
<b>SPDH</b>	Sistema de plantio direto de hortaliças
<b>SRM</b>	Sistema regenerativo de manejo
<b>SRM30</b>	Sistema de manejo com 30 anos
<b>SRM6</b>	Sistema de manejo com 6 anos
<b>SRM4</b>	Sistema de manejo com 4 anos
<b>UNU</b>	Organização das Nações Unidas

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Identificação, localização, tipo de cultivo, posição geográfica e descrição das áreas com cultivo grãos.....	28
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização granulométrica das áreas de estudos.....	29
Tabela 2- Caracterização química – Sistema regenerativo das áreas em estudo (30, 06 e 04 e suas respectivas matas nativas .....	30
Tabela 3 - Atributos físicos analisados nos SRM e suas respectivas áreas de mata nativa (MN) .....	32
Tabela 4 - Estoques de carbono (ECO), carbono orgânico frações granulométricas do carbono orgânico e teores carbono orgânicos nas classes dos agregados. ....	36

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	PROBLEMA .....	17
1.2	HIPÓTESES .....	18
1.3	OBJETIVO .....	18
1.4	JUSTIFICATIVA .....	18
1.5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
<b>1.5.1</b>	<b>Agricultura Regenerativa .....</b>	<b>19</b>
<b>1.5.2</b>	<b>Manejo Regenerativo e a Produção de Grãos.....</b>	<b>21</b>
<b>1.5.3</b>	<b>Atributos Físicos do Solo e os Efeitos na Produtividade de Grãos em Resposta ao Manejo.....</b>	<b>22</b>
<b>1.5.4</b>	<b>Estoques de Carbono e Matéria Orgânica como Indicativos dos Serviços Ecossistêmicos .....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
3.1	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.....	31
3.2	CARBONO ORGÂNICO NO SOLO .....	35
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da população, das atividades humanas e o uso descontrolado dos recursos naturais têm intensificado o aquecimento global e o efeito estufa, alterando assim os ciclos biogeoquímicos, em especial o ciclo do carbono (Tornquist *et al.*, 2009).

Estima-se pela Organização das Nações Unidas - ONU (2019), que para as próximas três décadas a população mundial atingirá a marca de 10 bilhões de pessoas e, o principal desafio para a humanidade será produzir alimentos para uma população crescente dentro da capacidade de suporte do planeta (Willett *et al.*, 2019; Schreefel *et al.*, 2020).

Dentro desta perspectiva, o Brasil é um dos países responsáveis para contribuir com a produção de alimentos (Santos *et al.*, 2021). Para suprir essa necessidade é necessário aumentar a eficiência produtiva nas áreas já abertas e evitar que ambientes naturais sejam transformados em áreas agrícolas (Alexandratos; Bruinsma, 2012; EMBRAPA, 2018). As áreas de sistema agrícolas abrangem uma fração significativa da superfície terrestre (Wilson *et al.*, 2022; Roberts *et al.*, 2023).

A mudança do uso da terra (MUT) de ambientes naturais para áreas agrícolas e práticas adotadas pelo modelo convencional de cultivo, impactam a qualidade e a saúde do solo, contribuindo para a degradação ambiental, com perda de biodiversidade, agravada por mudanças climáticas (Primieri *et al.*, 2017; Hawes, Iannetta, Squire, 2021). A MUT também está associada a degradação física do solo, com redução na disponibilidade de água e nutrientes, nas trocas gasosas, na dinâmica da matéria orgânica, à perda dos estoques de carbono orgânico (ECO), diminuindo os teores de carbono orgânico total (COT) no decorrer do perfil do solo, alterando a sua relação com os atributos ligados à qualidade e saúde do solo (Tornquist, *et al.*, 2009).

De acordo com PixForce (2021), a saúde do solo pode ser definida como a capacidade do solo de funcionar continuamente como um ecossistema capaz de sustentar plantas, animais e seres humanos. Nesse sentido, as práticas de manejo podem afetar a saúde do solo em relação aos seus atributos físicos e mudar as concentrações e frações de carbono.

O caminho apontado para manter e melhorar as propriedades indicativas de qualidade e saúde é a adoção e valorização das práticas voltadas para regenerar o solo e reduzir os efeitos das mudanças do uso da terra (Vianna, 2022). Portanto, o sistema regenerativo de manejo pode manter os atributos físicos e químicos do solo e reduzir a erosão, trazendo efeitos positivos na capacidade produtiva do solo (Machado; Wadt, 2021).

Este sistema de manejo busca a melhoria na qualidade do solo principalmente nas culturas de grãos (Tornquist *et al.*, 2009). Schreefel *et al.* (2022) afirmam que a agricultura regenerativa pode contribuir para mitigar mudanças climáticas, melhorar a ciclagem de nutrientes e a disponibilidade de água, restaurar os estoques de carbono e as frações granulométricas da matéria orgânica, associando-a às propriedades físicas e melhorando a qualidade do solo.

Os solos em seu estado natural sob vegetação nativa podem ser considerados como referências para avaliação da qualidade do solo (Calonego *et al.*, 2012). Espera-se que áreas de produção agrícolas, manejadas de maneira apropriada, mantenham o funcionamento ecológico, incluindo nutrientes, água e carbono, equivalentes à condição natural, com adequada capacidade produtiva (Hawes, 2020).

Para Hawes (2021), a conservação do solo depende mais da geração interna de produtos e serviços ecossistêmicos que de insumos externos, ou seja, a agricultura regenerativa trabalha com os serviços que o solo oferece, utilizando o mínimo de agentes externos para impulsionar a produtividade e manter ou melhorar a qualidade do solo (Rozane *et al.*, 2010; Viana *et al.*, 2011; De Vares; Centurion, 2015). Para White *et al.* (2012), os manejos sustentáveis são necessários para evitar maior degradação, pois operam fortemente na proteção do solo contra erosão, exposição ao sol, na ciclagem de nutriente e ao aporte de carbono do solo (Primavesi, 2002). Sistema plantio direto de hortaliças (SPDH) um sistema sustentável hoje bastante difundido principalmente em Santa Catarina, segue estratégias a fim de garantir a qualidade e saúde do solo, trabalhando com menor revolvimento do solo, uso de plantas de cobertura, e a rotação de culturas (Fayad *et al.*, 2019).

Adoção do uso de plantas de cobertura vivas ou em forma de palhada, protegem o solo contra a perda de solo, contribui com o aumento dos estoques de carbono, atuam como isolante térmico, controlam a umidade, melhoram a estrutura do solo, favorecerem o desenvolvimento da fauna edáfica, reciclagem dos nutrientes e permitindo que esses sejam transferidos de uma planta para a outra além da reciclagem da matéria orgânica (Fayad *et al.*, 2019).

A tentativa de reverter o processo de degradação física do solo e de recuperar a capacidade produtiva do mesmo, tem conduzido à mudança de postura dos produtores agrícolas, especialmente na região Sul do Brasil o (Aita *et al.*, 2006). Segundo Spera *et al.* (2019), compreender e quantificar os impactos do uso e manejo do solo na sua saúde é a base para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis.



A matéria orgânica do solo (MOS) representa um importante reservatório de carbono no solo. As suas diferentes frações constituem-se de características distintas, e a distribuição dessas frações no solo podem indicar modificações decorrentes do manejo empregados e podem ser estudadas através de técnicas de fracionamento, sugerido do por Cambardella, Elliott (1992), resultando na separação da quantidade total da MOS em duas frações orgânicas: o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM). O COP é a fração separada por dispersão e peneiramento do solo associada à fração areia onde ( $COP > 53\mu m$ ), sendo caracterizado como partículas cuja de permanência no solo está condicionada à proteção física desempenhada por agregados (Golchin *et al.*, 1994) e O COAM é a fração associada às frações silte e argila sendo ( $COAM < 53\mu m$ ), definida como a fração da MOS que interage com a superfície de partículas minerais (Christensen, 1996).

Diante disso, tornou-se importante avaliar os atributos físicos do solo e sua relação com os estoques de carbono orgânico e as frações granulométricas do carbono, como forma de promover a qualidade e saúde do solo em áreas de produção comercial de grãos. Tais alterações podem ser dependentes do tempo de adoção dos sistemas regenerativos de manejo.

## 1.1 PROBLEMA

A conversão dos ambientes naturais em áreas de produção agrícola, juntamente com o manejo adequado do solo nas áreas produtivas pode melhorar a qualidade física e química do solo e aumentar o estoque de carbono no solo (Pixforce, 2021).

Machado e Wadt (2021), acreditam que quando práticas agrícolas regenerativas são adotadas, o impacto na qualidade e saúde do solo será positivo, além de colaborar com a conservação de água, ciclagem de nutrientes, causar economia de combustível, mão de obra e tempo, favorecer o manejo de plantas invasoras e ocasionar maior aporte de carbono estocado no solo.

Sendo assim, é possível definir que práticas agrícolas regenerativas permitem a mitigação dos impactos causados pela mudança do uso da terra? E, que esse manejo apresentará condições ao longo do tempo de manter os estoques e frações granulométricas do carbono equivalentes aos da mata nativa?

## 1.2 HIPÓTESES

1. A mudança do uso da terra de sistema natural para agrícola manejado de forma regenerativa aumenta os teores de carbono das frações granulométricas da matéria orgânica do solo e melhora a qualidade física do solo.
2. O tempo de adoção de sistemas regenerativos de manejo (SRM) influencia os estoques e frações granulométricas de carbono orgânico e os atributos físicos do solo, em relação à mata nativa e interfere na qualidade e a saúde do solo.

## 1.3 OBJETIVO

Avaliar áreas de produção de grãos com sistemas regenerativo de manejo, em diferentes tempos de implantação e sua influência sobre com atributos físicos do solo e sua relação com os teores de carbono orgânico total, particulado, associados aos minerais, e os estoques de carbono e, comparativamente as áreas de mata nativa.

Objetivos específicos:

1. Avaliar o efeito do manejo nos atributos físicos do solo em áreas de produção de grãos com sistemas regenerativo de manejo, em diferentes tempos de implantação e matas nativas correspondente.
2. Quantificar os teores de carbono total, particulado, associados aos minerais e os estoques de carbono solo em áreas de produção de grãos com sistemas regenerativo de manejo, em diferentes tempos de implantação e matas nativas correspondentes.
3. Analisar os teores de carbono orgânico do solo e relacionar a sua influência nos atributos físicos nas áreas com sistema regenerativo de manejo e áreas de mata nativa adjacentes.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

A conversão de ambientes naturais em áreas de cultivos agrícolas pode alterar a estrutura do solo, com mudanças nas concentrações e frações da matéria orgânica do solo (MOS) (Nunes *et al.* 2011). Porém, um manejo adequado, pode aumentar a qualidade do solo (Bayer *et al.*, 2000). Segundo Spera *et al.* (2019), compreender e quantificar os impactos do uso e manejo do solo na sua saúde é a base para o desenvolvimento de sistemas agrícolas que garantam a manutenção e a qualidade do mesmo.

O sistema regenerativo de manejo busca proteger e melhorar a estrutura do solo em comparação aos sistemas que envolvem aração, gradagem e escarificação. Essa prática não revolve o solo, mantém a cobertura vegetal, favorece o acúmulo de carbono orgânico, melhora

os atributos físicos, promove a ciclagem de nutrientes, além de mitigar os efeitos causados pelas mudanças climáticas (Six *et al.*, 1999; Bayer *et al.*, 2000; Lovato *et al.*, 2004; Hickmann; Costa, 2012).

Com o emprego de manejo de base regenerativa pode-se estimular interação entre atributos físicos e carbono orgânico, os quais seriam bons indicadores das práticas mais adequadas para tornar a agropecuária mais sustentável, elevar sua produtividade, reduzir a emissão de carbono para atmosfera e diminuir sua pressão sobre as áreas naturais (Sales *et al.*, 2018).

## 1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.5.1 Agricultura Regenerativa

Agricultura regenerativa (AR), termo sugerido por Robert Rodale em 1983, refere-se à necessidade de restabelecer sistemas naturais em áreas agrícolas. Esse manejo busca maior produção de alimentos, ao mesmo tempo em que otimiza os ciclos da água, aumenta a biodiversidade, melhora os serviços do ecossistema e promove e sequestra carbono, com melhoria na qualidade e saúde do solo, e no meio ambiente (Schreefel *et al.*, 2022).

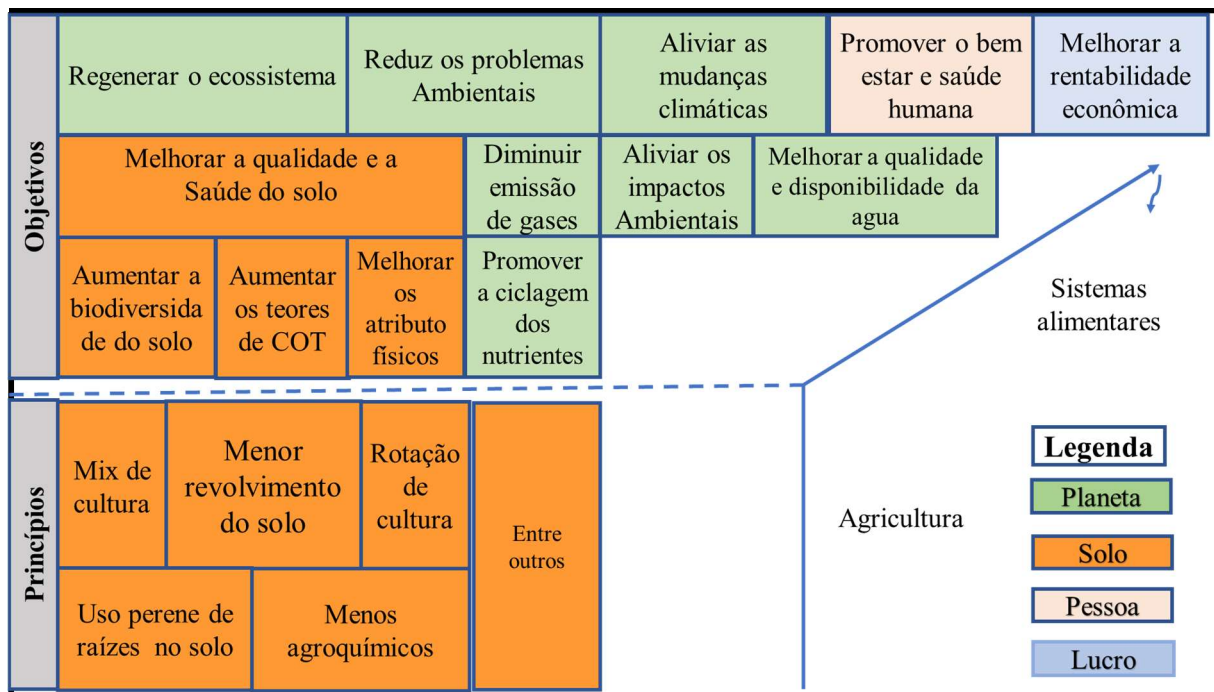
Este tipo de manejo permite regenerar os recursos naturais e, ao mesmo tempo, atender às necessidades globais de abastecimento de alimentos e garantir benefícios sociais e econômicos adequados aos agricultores (Wilson *et al.*, 2022). A agricultura regenerativa está incluída dentro de vários movimentos, como agricultura alternativa, agricultura de conservação, agricultura orgânica, agricultura sustentável, permacultura e agroecologia.

Segundo Blignaut (2015) e Musto (2023), a AR tem como objetivo a restauração ecológica das áreas de produção agrícolas e não somente a manutenção da sua sustentabilidade. Para Schreefel *et al.* (2020), é definida como abordagem agrícola que usa a proteção do solo como ponto de partida para a restauração e contribui para a provisão, regulação e suporte de diversos serviços ecossistêmicos, com propósito de melhorar não apenas os aspectos ecológicos, mas também os aspectos sociais e econômicos da produção sustentável de alimentos.

Desta forma, a AR está baseada no princípio de se trabalhar com o que a natureza pode oferecer (Teixeira, 2023). Embora o termo AR não traga definições claras, alguns autores citam como sendo uma solução necessária para amenizar os impactos causados pela produção de alimentos de forma inadequada (Schreefel *et al.*, 2020).

Schreefel *et al.* (2020) compilaram os objetivos e os princípios mencionados por alguns autores sobre a agricultura regenerativa (Figura 1), a fim de definir melhor este conceito.

Figura 1 - Objetivos e princípios da agricultura regenerativa



Estes princípios básicos para regenerar ou manter o solo saudável também foram apresentados pelo Serviço de Conservação de Recursos Naturais do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2023).

O revolvimento do solo altera a estrutura do solo, com fragmentação dos agregados, deixando o solo sensível aos efeitos da erosão, interrompe os ciclos de nutrientes e as atividades biológicas (Bronick; Lal, 2005). O não revolvimento do solo contribui para que as plantas cooperem entre elas e os demais organismos presentes no solo (Teixeira, 2023).

O sistema regenerativo manejo (SRM) considera como um fator importante a adoção de cobertura vegetal diversificada, uma vez que, quanto maior a diversidade de plantas, menor a concorrência com plantas invasoras e doenças nas culturas (Teixeira, 2023). A manutenção do solo coberto com plantas vivas e com resíduos, além de amparar a vida em seu interior (Teixeira, 2023), também evita a erosão e a desagregação causados pelo vento e principalmente pelo impacto das gotas da chuva na superfície do solo (Ramos *et al.*, 2010; Wolschick *et al.*, 2021; Calegari, 2021).

A rotação de culturas pode tornar o sistema mais resistente a agentes externos, como pragas e plantas indesejáveis, pode contribuir com a estabilidade de agregados, aumentar os níveis de carbono orgânico e a biodiversidade do solo (Mcdaniel; Dougherty, 2018).

O controle de pragas, doenças, plantas daninhas e a melhoria da fertilidade do solo são grandes desafios na agricultura regenerativa (Viana *et al.*, 2022). Os produtores que utilizam esse tipo de manejo realizam procedimentos para reduzir ervas daninhas e favorecer o crescimento das espécies cultivadas (Snyder; Spaner, 2010).

Outro enfoque é voltado ao crescimento do sistema radicular, que pode promover a estrutura do solo, com agregados estáveis, melhor distribuição dos poros para circulação da água e do ar, e contribuir com os teores e estoques de carbono, com manutenção da matéria orgânica no solo (Salton; Tomazi, 2014).

Importante salientar que práticas que procuram atender às crescentes demandas mundiais de alimentos, que integram o gerenciamento da produção de alimento, segurança alimentar com variabilidade climática, abrangem a agricultura inteligente para o clima” climate-smart agriculture” (Okumo; Sibiko, 2023), pode atuar como sumidouro do carbono no solo e reduzir a ação dos gases do efeito estufa na atmosfera (Lobell; Villoria, 2023).

É relevante destacar que, com a intensificação das mudanças climáticas, é de extrema importância a adoção de práticas agrícolas sustentáveis. A agricultura de resiliência climática, também conhecida como agricultura inteligente para o clima, é a resposta para garantir a produtividade, ao mesmo tempo em que preserva os recursos naturais e reduz os impactos adversos das mudanças ambientais (Assad *et al.*, 2022.).

### **1.5.2 Manejo Regenerativo e a Produção de Grãos**

O Brasil é um dos maiores produtores de grãos do mundo, com produção esperada para safra 2022/23 de 315,8 milhões de toneladas, com aumento de 40,1 milhões em relação à safra anterior (Conab, 2023) Dentro desses períodos, os produtos mais destacados são a soja, com produção de 155 milhões de toneladas, seguida do milho, com 125,8 milhões de toneladas (Conab, 2023).

O SRM pode mitigar os impactos ambientais causados pelo preparo convencional do solo, como a degradação do solo pela erosão e perda de rendimento associada à seca e a redução nos níveis de carbono orgânico do solo (Mielniczuk *et al.*, 2003, Bayer *et al.*, 2006; Ferreira *et al.*, 2016).

Essa prática tem sido recomendada como alternativa para restaurar o estoque de carbono orgânico (ECO) e melhorar a qualidade do solo em sistemas de produção de grãos (Bayer *et al.*, 2006; Derpsch *et al.*, 2014; Ferreira *et al.*, 2016). Esta forma de manejo pode ser adotada para diminuir os riscos de deterioração do solo, sustentar a produtividade dos agroecossistemas (Mielniczuk *et al.*, 2003; SÁ *et al.*, 2014) e manter ou melhorar a estrutura e qualidade do solo (Vezzani; Mielniczuk, 2011).

Resultados com SMR sobre a qualidade do solo são escassos. Diante disso, faz necessários avaliar o manejo conservacionista ao longo do tempo de adoção desse sistema.

Gregório (2022), apresentou resultados interessantes quando comparou a produção de repolho em Sistema de Plantio Convencional - (SPC) e SPDH, comprovando que o SPDH melhorou a qualidade do solo e aumentou o rendimento do repolho ao longo do tempo. Uma pesquisa desenvolvida na estação experimental da EPAGRI do município de Ituporanga com cultivo de cebola, apresentou resultados positivos na agregação do solo, na umidade, e na porosidade total ao comparar o SPDH com SPC, e os resultados encontrado no SPDH em relação aos atributos físicos foram equiparados aos da mata nativa (Loss, *et al.*, 2017).

### **1.5.3 Atributos Físicos do Solo e os Efeitos na Produtividade de Grãos em Resposta ao Manejo**

Reinert; Reichert (2006), destacam a importância dos atributos físicos do solo como indicadores da capacidade produtividade das culturas. Entre os atributos físicos do solo, a densidade do solo (DS) pode sofrer alterações dependendo do uso e do manejo do solo (Carvalho *et al.*, 2020; Viana, 2008). O aumento na densidade é acompanhado por diminuição na porosidade, afetando negativamente o desenvolvimento do sistema radicular (Brady; Weil, 2013).

A porosidade total e a distribuição de poros (macro e microporosidade) são relacionadas com o crescimento das raízes, movimento de ar e dinâmica da água (Reinert; Reichert, 2006).

Outro atributo importante para avaliar os efeitos do manejo do solo na produtividade de grãos, é a estabilidade dos agregados, a qual também influencia a distribuição da água no solo, incluindo escoamento, infiltração, aeração e o crescimento das raízes (Kemper; Rosenau, 1986).

Loss *et al.* (2017) concluíram que através do SPDH, foi possível manter um ambiente edáfico favorável à formação de agregados estáveis, oriundo do não revolvimento do solo e da presença permanente de raízes vivas e cobertura vegetal, salientado que solos com agregados

menos estabilizados se tornam propenso à erosão e à perda de fertilidade, quando comparados ao sistema utilizado como referência de qualidade (mata nativa).

A estrutura do solo é o fator que regula diversos processos, como o movimento da água, a oxigenação e a temperatura do solo, considerada um importante atributo para o desenvolvimento das plantas (Salton *et al.*, 2008; Rozane *et al.*, 2010; Loss *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2018), além de influenciar a resistência à erosão do solo (Turmel *et al.*, 2015).

A estabilidade de agregados resulta da união das partículas primárias do solo pela ação cimentante da matéria orgânica e de coloides minerais (Kemper; Rosenau, 1986; Madari 2004; Melloni, 2013). Segundo SIX *et al.* (2000); Texeira (2023) essa união de partículas pode ser comprometida quando há diminuição dos teores de matéria orgânica associada com o intenso revolvimento do solo.

LI *et al.* (2019) ressaltam que as práticas de manejo convencionais que utilizam revolvimento do solo, adição de corretivos e fertilizantes, afetam diretamente às propriedades físicas do solo. Já o aumento da agregação do solo pode ser alcançado com menor intensidade de preparo do solo e maior aporte de resíduos, por meio dos manejos regenerativos.

Neira *et al.* (2015), expressam a importância dos agregados ao afirmar que eles influenciam no armazenamento do carbono (C) do solo, sendo a avaliação do C uma das formas de se relacionar com a estabilidade dos agregados, os quais se tornam atributos indicadores do estado de conservação do solo.

#### **1.5.4 Estoques de Carbono e Matéria Orgânica como Indicativos dos Serviços Ecossistêmicos**

O solo vivo é tão importante para sobrevivência humana quanto o ar, a água e luz solar, sendo considerado pilar fundamental para economia, vida e para o meio ambiente (Calegari *et al.*, 2021).

No entanto, solos mal manejado, os quais adotam sistemas convencionais, que utilizam técnicas que facilitam a erosão, evaporação do solo de forma mais rápida, e fazem com que o carbono orgânico oxide e se transfira para a atmosfera na forma de CO<sub>2</sub>, além de técnicas que quebram os agregados e destroem a organização dos fungos, diminuindo a qualidade e saúde do solo e principalmente o aporte de C no solo (Lal, 2002; Montgomery, 2007; Moyer .2020), sendo que quando manejado de forma adequada, ocorre o aporte de C da atmosfera para o solo, sendo uma estratégia para mitigar as mudanças climáticas e colaborar com a formação da matéria orgânica do solo (Cerri *et al.*, 2006).

A matéria orgânica (MO) refere-se à fração orgânica do solo em diferentes estágios de decomposição (Kooch; Ehsani; Akbarinia, 2020). A MO é importante no fornecimento de energia, substratos e a biodiversidade necessária para sustentar funções sistêmicas variadas, (Haynes, 2005) que determinam a estabilidade do ecossistema e pode ser usada como indicador do funcionamento do ecossistema solo. Além disso, sua presença na superfície e no interior do solo é essencial para o controle da erosão, infiltração de água e ciclagem de nutrientes (Bongiorno, 2019).

A MO é a principal fonte de energia para os microrganismos do solo e plantas, (Lal, 2016), e fornece nutrientes (Barilli 2005; Arruda, 2020). A matéria orgânica é considerada importante fonte de cargas negativas para o solo, as quais estão relacionadas com a retenção de nutrientes catiônicos, como o potássio, além de atuar como tampão, mantendo os níveis de pH do solo estáveis (Ernani, 2016).

A avaliação de serviços ecossistêmicos desempenhados pelo solo tem ganhado atenção pelos benefícios para o bem-estar do homem, podendo ser destacados o aporte de carbono, que representa um dreno deste elemento da atmosfera e pode mitigar os eventos climáticos extremos; a manutenção do equilíbrio do ciclo hidrológico, com regulação de processos críticos de erosão e deslizamentos do solo; a manutenção ou renovação da fertilidade e a diversidade biológica (Machado; Wadt, 2021).

Práticas agrícolas que adotam o uso de cobertura do solo, geralmente apresentam melhores índices na estabilidade dos agregados, porosidade total, umidade volumétrica, restauram e aumentam os teores de carbono orgânico total do solo, estimular a infiltração de água, atividade biológica e capturam CO<sub>2</sub> diminuindo a emissão de gases nocivos a atmosfera, além de aumentar a produtividade, comparados às práticas convencionais (Loss, *et al.*, 2017).

O SRM, adota princípios que atuam no ECO, o uso de diversidade de plantas e a manutenção da cobertura viva ou morta no solo desempenham um papel importante, na construção de estruturas complexas para formação da matéria orgânicas, além de sustentar a cadeia alimentar (Moyer, *et al.*, 2020).

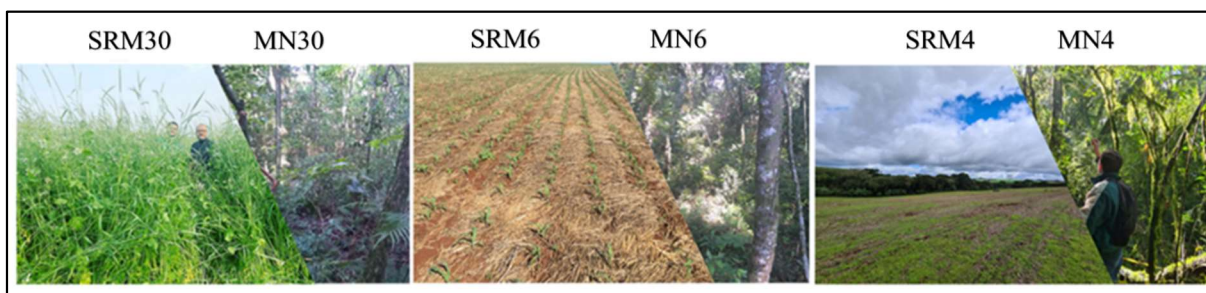


## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em três propriedades agrícolas localizadas na região Sul do Brasil. As áreas desenvolvem sistemas regenerativos de manejo (SRM) com produção comercial de grãos, com tempos de manejo de 30 anos, em Zortéa/SC; 6 anos em Vacaria, RS e 4 anos em Campos Novos/SC.

Cada propriedade foi considerada como réplica verdadeira do sistema de manejo. Além das áreas agrícolas, também foram avaliadas áreas adjacentes de mata nativa (MN), usadas como referência de qualidade do solo (Figura 2). O clima é classificado segundo Köppen, como mesotérmico úmido (Cfb) com verão ameno, com temperatura média anual de 17°C e precipitação anual de 1.550 mm (Souza; Cunha, 2010; Álvares et al., 2013). O solo predominante nas áreas é Latossolo Bruno.

Figura 2- Áreas utilizadas para o estudo

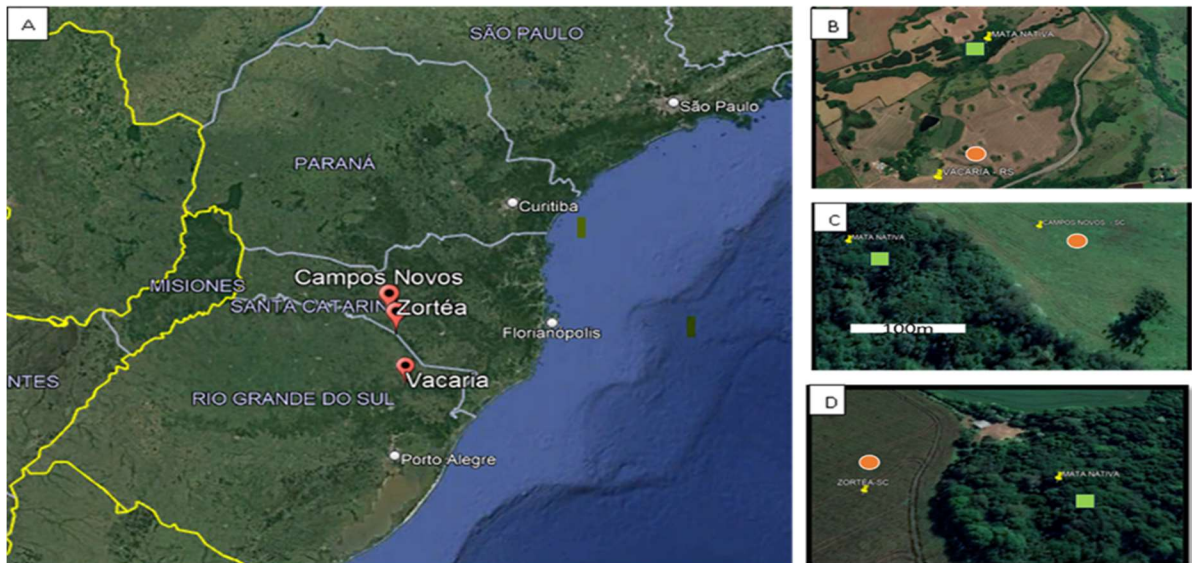


Legend©SRM30: área com 30 anos de manejo regenerativo; MN30: área de referência adjac©e; SRM6: área com 6 anos de manejo regenerativo; MN6 área de referência ad©ente; SRM4: área com 4 anos de manejo regenerativo; MN4: área de referência adjacente.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A figura 3, representa a região sul do Brasil onde estão situadas as áreas de estudos, nas quais foram realizadas as coletas de solo para a execução das análises. As áreas de uso agrícola por sistema regenerativo de manejo foram sinalizadas pelos círculos na cor laranja e as áreas de mata nativa adjacentes sinalizadas pelos quadrados na cor verde.

Figura *Erro! Argumento de opção desconhecido.* - Mapa da região sul do Brasil e das áreas em estudo

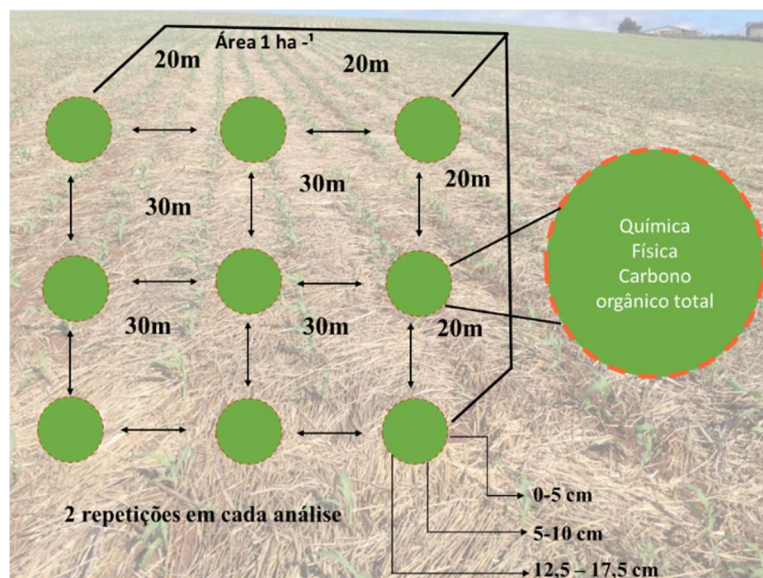


Legenda: Mapa da região sul do Brasil (A) áreas situadas no município de Vacaria/RS (B), áreas situadas na no município de Campos Novos/SC (C), áreas situadas no município de Zortéa (D), símbolos ■ representam as áreas da mata nativa; e símbolos ● representam as áreas agrícolas, escala de 100m.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Para avaliação dos atributos do solo foi selecionado um hectare representativo de cada área de estudo (Figura 4), no qual foi estabelecida grade amostral de 3 x 3, com nove pontos, distanciados em 30 metros, e 20 metros da bordadura. Em cada ponto foram coletadas as amostras compostas de solo para avaliação do solo. No período de setembro a novembro do ano de 2021.

Figura 4 - Grade amostral



Fonte: adaptado de Kraft et al., (2021).

O Quadro 1, apresenta o histórico das áreas utilizadas para cultivo comercial de grãos e descreve produtividade, utilização de agroquímicos e suas respectivas doses, o tempo, e o tipo de manejo adotado e a localização das áreas.

As amostras com estrutura indeformada foram coletadas em anéis volumétricos de 5 cm de altura e 6 cm de diâmetro em duas subamostras por parcela, com o auxílio de pá de corte para a preservação da estrutura, nas camadas de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm e 10 a 20 cm de profundidade, para determinar a disponibilidade de água, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidades, bioporos, conforme o manual da Embrapa (1997). Ente os meses de setembro a novembro de 2021.

Quadro 1 - Identificação, localização, tipo de cultivo, posição geográfica e descrição das áreas com cultivo grãos.

Área	Coordenadas geográficas	Altitude	Tipo de solo	Histórico pré-implantação do sistema atual	Anos sem revolvimento do solo	Adubação orgânica	Adubação química	Diversidade de plantas cultivadas	Produtos químicos utilizados nos últimos anos	Manejos e insumos alternativo utilizados nas áreas nos últimos anos	Média de produtividade dos últimos anos
SRPG4 (Zortea/ SC)	27°26'16.3"S 51°27'13.3"W	774 m	Latossolo 62% argila	Plantio direto desde 1989.	26 anos	Cama de aves - média de 6 t/ha/ano.	Não	Milho, soja, feijão e trigo; mix de cobertura (aveia branca, centeio, ervilhaca, nabo forrageiro e ervilha forrageira).	Bentazona, atrazina, simazina, glifosato e cletodim.	Pó de rocha (4t/ha a cada três anos); Microrganismos eficientes nativos; <i>Bacillus subtilis</i> ; <i>Bacillus pumilus</i> ; <i>Beauveria bassiana</i> ; <i>Metarhizium</i> ; extrato pirolenhoso (0,5-1%); Técnica de radiônica; Geobiologia (radiestesia); Homeopatia.	Milho = 135 scs/ha; Soja = 62 scs/ha; Feijão = 42 scs/ha; Trigo = 50 scs/ha.
SRPG6 (Vacaria/ RS)	28°35'33.9"S 51°02'05.4"W	865 m	Latossolo 50% argila	Plantio direto desde 1995. Integração com pecuária até 2017.	16 anos	Cama de aves - média de 3 t/ha/ano.	Sim	Soja, milho, trigo, aveia; mix de cobertura (ervilhaca, aveia Branca, aveia Preta, nabo forrageiro, centeio).	Glifosato, cletodim, glufosinato de amonia, metsulfuron metyl, algumas atrazinas, diquat e triazóis, diflubenzuron, diquat, espinosidas, acetamipridos, neonicotinoides.	<i>Bacillus spp</i> ; <i>Trichoderma</i> ; <i>Cromobacteria</i> ; <i>Azospirillum</i> ; <i>Pseudomonas spp</i> .	Milho = 150 scs/ha; Soja = 60 scs/ha; Trigo = 60 scs/ha; Aveia branca (grão) = 3000 kg/ha.
SRPG30 (Campos Novos/ SC)	27°29'34.9"S 51°26'35.8"W	794 m	Latossolo 48% argila	Plantio direto desde 2005, com adubações orgânicas esporádicas	32 anos	Cama de aves - média de 7,8 t/ha/ano.	Não	Milho, soja, trigo; mix de cobertura (aveia branca, aveia preta, centeio, ervilhaca, nabo forrageiro e ervilha forrageira).	Paraquat, fomesafem, atrazina, simazina, tembotriona.	Fosfato natural reativo (600kg/ha/ano); Pó de rocha (5t/há a cada três anos); <i>Trichoderma</i> ; <i>Azospirillum</i> ; <i>Bacillus subtilis</i> ; <i>Bacillus thuringiensis</i> .	Milho = 170 scs/ha; Soja = 60 scs/ha; Trigo = 85 scs/ha.

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Para análise de estabilidade de agregados foram coletadas amostras deformadas de solo com auxílio de pá reta nas camadas de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm e 10 a 20 cm de profundidade. A metodologia de avaliação da estabilidade foi de peneiramento úmido, conforme descrito por Kemper; Chepil (1965). As classes de agregados foram consideradas macroagregados grandes (A) com diâmetro entre 8,0 e 4,76 mm, e demais agregados (BCD) com diâmetro inferior a este limite. Nestas duas classes de agregados foram analisados os teores de COT por meio do TOC, resistência à penetração do solo foi avaliada no campo com penetrômetro digital PenetroLOG Falker 1020, de acordo com Soriani *et al.* (2018). Para a análise granulométrica foi utilizado o método da pipeta, conforme Day (1965); Gee e Bauder (1986). Os atributos granulométricos e químicos do solo (Tabela 1 e 2) são apresentados para caracterização das áreas avaliadas.

Tabela 1 - Caracterização granulométrica das áreas de estudos

ÁREAS	Camadas cm	Granulometria (g.kg <sup>-1</sup> )			Textura
		Areia	Argila	Silte	
SRM30	0 - 20	58,6	461,5	479,9	Argila-siltosa
MN30	0 - 20	109,1	540,5	381,7	Argila-siltosa
SRM6	0 - 20	109,7	490,5	399,8	Argilo-siltosa
MN6	0 - 20	290,0	180,0	530	Franca
SRM4	0 - 20	62,7	604,9	350,6	Muito Argilosa
MN4	0 - 20	70	330	600	Franco-argilo-siltosa

Fonte: elaborado pela autora (2023).

As análises químicas do solo foram realizadas em amostras compostas, com nove subamostras de solo ao redor de cada ponto, retiradas com trado holandês, misturadas e homogeneizadas. Nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 cm. Os atributos químicos seguiram as metodologias descritas por Tedesco *et al.* (1995), com determinações de pH em água, teores de Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, P, K<sup>+</sup>, MO, Al<sup>+3</sup>, H+Al e CTC a pH 7,0.

Os estoques de carbono (ECO) foram determinados pelo método de camada equivalente, a partir determinação do carbono orgânico total (COT) e da densidade do solo, conforme método descrito. Cambardella e Elliott (1992) As amostras foram moídas com auxílio de um moedor e peneiradas em uma peneira de 0,053 mm, em seguidas foram acondicionadas em Ependorf e levadas ao equipamento analisador de carbono orgânico total (TOC-V<sub>CPN</sub>), (marca Shimadzu), onde foi medido o carbono orgânico total.

Tabela 2- Caracterização química – Sistema regenerativo das áreas em estudo (30, 6 e 4 anos) e suas respectivas matas nativas

Camada	ÁREA	pH/H <sub>2</sub> O	pH/SAL	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	P	K
cm				----- cmol/dm <sup>3</sup> -----			---- mg/dm <sup>3</sup> ----	
0-5	SRM30	5,3	4,9	6,0	2,7	1,05	92,4	462
	MN30	5,2	4,9	10,6	2,9	0,7	13,4	163
5-10	SRM30	5,3	4,9	5,7	3,0	1,0	9,8	474
	MN30	5,2	4,8	8,7	2,1	1,6	11,3	121
10-20	SRM30	4,9	4,6	5,2	1,8	0,9	16,9	407
	MN30	5,1	4,7	6,8	2,5	1,3	57,8	92
0-5	SRM6	5,4	5,2	9,5	1,9	0,13	21,8	359
	MN6	5,7	5,4	17,7	2,2	0,17	22,5	395
5-10	SRM6	5,1	4,8	7,6	1,5	0,2	21,2	198
	MN6	5,8	5,6	18,3	2,3	0,4	27,4	336
10-20	SRM6	4,0	4,5	5,4	1,2	0,1	12,6	138
	MN6	5,9	5,4	15,1	1,6	0,8	17,2	276
0-5	SRM4	6,0	5,1	8,4	1,8	0,1	20,0	189
	MN4	5,3	5,3	11,8	3,5	0,3	24,7	194
5-10	SRM4	6,0	5,2	8,0	1,4	0,1	18,3	118
	MN4	5,3	5,0	9,6	3,4	0,5	21,3	130
10-20	SRM4	5,9	5,2	7,2	3,3	0,1	8,7	87
	MN4	5,2	4,7	7,4	1,2	0,7	17,6	99

Fonte: elaborado pela autora (2023).

O fracionamento físico granulométrico de carbono foi realizado em amostras de solo das camadas 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm, coletadas com trado calador, conforme descrito por Cambardella e Elliott (1992). O COP é a fração da MOS separada por dispersão e peneiramento do solo associada à fração areia (COP > 53µm), sendo qualificado como partículas derivadas de resíduos de plantas e hifas. O carbono associado aos minerais (CAM), foi obtido pela subtração do valor de COP do COT. A fração associada aos minerais foi obtida por diferença entre o carbono orgânico total e a fração particulada. O COAM é a fração da MOS associada às frações silte e argila do solo (COAM < 53µm), sendo definida como a fração da MOS que interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organominerais (Loss *et al.*, 2009).

Os resultados foram analisados por teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov a 5% de significância e após atestada normalidade, foi aplicado teste de Tukey para comparação das médias, por meio do programa Sisvar (Ferreira, 2011). A análise de correlação de Pearson entre os atributos do solo foi realizada no programa Jamovi a 5% de significância (Mariano; Melo, Nicolino, 2022).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

A tabela 3, apresentaram os resultados referentes aos atributos físicos do solo de acordo com a sua atividade funcional. Na área agrícola de 30 anos pode se analisar variação da densidade do solo de 1,11 a 1,15 g/cm<sup>3</sup> e 1,01 a 1,04 g/cm<sup>3</sup> para mata nativa. O SRM6 apresentou valores de 1,15 a 1,25 g/cm<sup>3</sup> e 0,93 a 1,03 g/cm<sup>3</sup> para a mata nativa. Na área SRM4, os valores foram entre 1,28 a 1,29 g/cm<sup>3</sup> e 0,83 a 0,94 g/cm<sup>3</sup>. Assim, as áreas agrícolas estão abaixo do limite crítico de compactação de 1,40 a 1,50 g/cm<sup>3</sup>, considerado para o tipo de solo (argiloso) (Alcântara, *et al.*, 2022). Sendo assim, as áreas em SRM apresentam adequada qualidade física do solo para o desenvolvimento das raízes.

As áreas agrícolas apresentaram variação na distribuição dos poros em relação à condição natural (MN) com diminuição da macroporosidade, aumento da microporosidade, e consequentemente, diminuição da porosidade total (Tabela 3). O SRM30 nas camadas de 0 a 5 a 10 a 20 cm, apresentou valores entre 0,9 a 0,20 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e 0,19 a 0,13 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para macroporosidade. A microporosidade teve valores de 0,53 a 0,49 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> em SRM30 e 0,51 a 0,50 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para MN correspondente. A área de SRM com 6 anos foi a que apresentou menor variação entre a distribuição dos poros, resistência à penetração e estabilidade de agregados em comparação com à MN (Tabela 3). A macroporosidade foi destaque nas áreas de SRM6 e MN nas camadas de 0 - 5 e 10-20 cm, com valores de, 0,18; 0,15 e 0,18; 0,17 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente. Os valores são adequados para suprir aeração as plantas (Carvalho, 2020). A microporosidade apresentou semelhanças nas camadas de 5 a 10 e 10 a 20 cm, com valores de 0,48; 0,47 e 0,49 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente. Destaca-se que os resultados apresentados para os atributos físicos do solo na MN6 podem ter sofrido influências da textura, por ser um solo mais arenoso que as demais áreas (Tabela 1). Resultados semelhantes foram encontrados por Santos *et al.* (2021) ao estudarem áreas de produção agrícola na região de MATOPIBA e áreas não antropizadas utilizadas como referência. Embora a MUT tenha alterado a distribuição dos poros entre os SRM e a MN, não apresentaram restrição para difusão do ar e percolação da água nas áreas analisadas. Carneiro *et al.* (2009) afirmam que a porosidade é um dos atributos físicos que ajuda identificar os impactos causados pelos manejos.

A RP teve valores de entre 89 a 2020 MPa, e 134 a 1085 MPa, para área com maior tempo de manejo e o ambiente usado como referência de qualidade do solo. O SRM6, assim como na porosidade, apresentou menor diferença entre os dois sistemas em estudo, com valores

de resistência de 37 a 1267 a 82 a 1044 MPa, entre a camada superficial e a mais profunda (Tabela 3). Embora as áreas tenham sofrido variações significativas, não ultrapassaram o limite crítico de 2000 MPa, considerado impeditivo para o desenvolvimento do sistema radicular (Drescher *et al.*, 2012).

Tabela 3 - Atributos físicos analisados nos SRM e suas respectivas áreas de mata nativa (MN)

Áreas	Camada	DS	PT	MACR	MICR	BIO	RP	DMP	U <sub>g</sub>
	cm	g cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	MPa	mm	g/g
SRM30	0-5	1,11	0,62	0,09	0,53	0,04	89	5,9	0,32
MN30	0-5	1,01*	0,67*	0,19*	0,51	0,06*	134	5,5*	0,32
CV	0-5	4,1	2,6	16,3	2,4	20,3	92,1	4,7	13,7
SRM30	5-10	1,18	0,61	0,10	0,51	0,05	976	5,8	0,32
MN30	5-10	1,05*	0,67*	0,20*	0,49*	0,08*	467*	5,5	0,32
CV	5-10	9,5	4,0	21,4	4,4	30,4	32,1	8,4	12,7
SRM30	10 - 20	1,15	0,63	0,13	0,50	0,06	2020	6,0	0,33
MN30	10 - 20	1,04*	0,67*	0,18*	0,48*	0,09*	1085*	5,7*	0,33
CV	10 - 20	5,2	3,5	18,4	4,9	30,6	22,4	4,2	13,4
SRM6	0-5	1,15	0,64	0,12	0,45	0,06	37	5,1	0,35
MN6	0-5	0,93	0,68*	0,18*	0,55*	0,06	82	5,3	0,33
CV	0-5	6,1	4,1	19,8	5,6	17,2	86,0	10,5	13,0
SRM6	5-10	1,24	0,62	0,14	0,48	0,07	450	5,4	0,32
MN6	5-10	1,01	0,67*	0,18*	0,49	0,14*	462	5,2	0,33
CV	5-10	6,1	2,1	11,4	3,7	22,8	71,9	7,2	13,6
SRM6	10 - 20	1,25	0,62	0,15	0,47	0,07	1267	5,2	0,32
MN6	10 - 20	1,03	0,66*	0,17*	0,48	0,15*	1044	6,1*	0,33
CV	10 - 20	8,0	4,0	37,6	8,4	33,6	35,8	5,7	14,1
SRM4	0-5	1,28	0,60	0,07	0,52	0,05	63	5,1	0,34
MN4	0-5	0,83*	0,69*	0,19*	0,48*	0,11*	67	5,3	0,34
CV	0-5	2,2	2,3	16,6	5,7	31,5	118,0	4,1	11,2
SRM4	5-10	1,34	0,57	0,07	0,51	0,05	1174	5,5	0,33
MN4	5-10	0,93*	0,68*	0,20*	0,48	0,08*	389*	5,4	0,34
CV	5-10	5,8	4,4	11,5	4,0	62,2	57,0	4,4	12,9
SRM4	10 - 20	1,29	0,61	0,10	0,49	0,08	2129	5,2	0,34
MN4	10 - 20	0,94*	0,65*	0,19*	0,48*	0,10*	384*	5,2	0,33
CV	10 - 20	5,3	4,3	17,3	4,9	59,2	24,2	5,3	13,8

Legenda: Símbolo \* são os atributos que apresentaram diferença significativas ao teste de média a 5% de significância. PT: porosidade total; MACR: macroporosidade; MICRO: microporosidade do solo; BIO: bioporos; DS: densidade do solo; RP: resistência à penetração; DMP diâmetro médio ponderado.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Quanto aos resultados da estabilidade de agregados, o SRM30 na camada superficial, teve valores de DMP de 5,9 mm, o que foi maior que a MN, que apresentou DMP de 5,5 mm (Tabela 3).

Santos *et al.* (2000) afirmam que, quando plantas de cobertura com sistema radicular bem ramificado são utilizadas, conseguem romper as camadas compactadas do solo; além disso, auxiliam na formação de agregados. A maior estabilidade de agregados na área agrícola pode



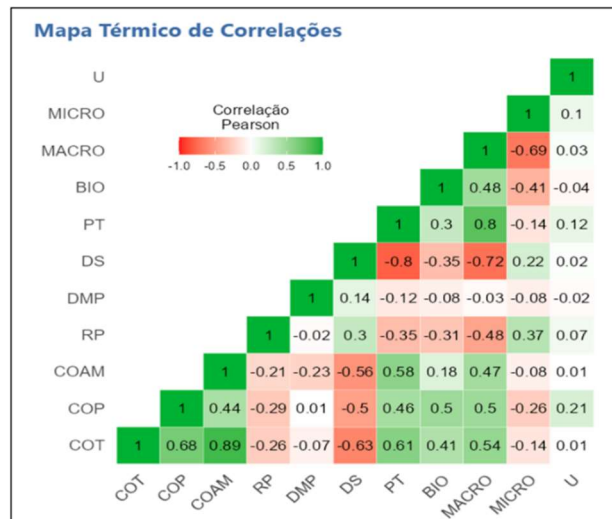
ser associada com o aporte de material orgânico pelas plantas, à ação das raízes e fauna do solo e está associada ao não revolvimento do solo (Caraminan; Fruet; Gasparetto, 2020).

O DMP na camada de 5 a 10 cm foi semelhante entre SRM30 e MN, com valores de 5,8 e 5,5 mm, respectivamente. O DMP na camada mais profunda foi maior SRM30 em relação à MN, o que evidencia o efeito adequado do manejo sobre a qualidade física do solo.

A área com SRM6 foi semelhante à MN nas camadas superficiais, com valores de DMP de 5,1 a 5,4 mm nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm. Na camada mais profunda, o DMP da área SRM6 foi de 5,2 mm, inferior à MN, que teve valor 6,1 mm. Isto pode ser associado com o teor de COT e das demais frações granulométricas do carbono foram superiores na mata nativa em relação à área de cultivo (Tabela 4). A matéria orgânica age como cimentante das partículas de areia, argila e silte e aumenta a estabilidade de agregados. Na área SRM4 os valores de DMP variaram de 0,51 a 0,52 mm e à MN em 5,3 a 6,2 mm.

As figuras 5 e 6 referem-se à correlação existente entre os atributos físicos do solo e os teores de carbono, estoques de carbono orgânico e as frações granulométricas do carbono orgânicos (COP e COAM). As relações indicadas pela cor verde, são relações significativas e positivas, e as vermelhas, são correlações negativas. Quanto maior a intensidade da cor, maior será correlação entre os atributos, seja pela cor verde ou vermelha. Em branco não há correlação entre os atributos analisados. Houve, correlação negativa entre a estabilidade de agregados e os teores de COT, e estoques e as demais frações do C (figura 5 e 6). Tal resultado pode estar relacionado ao tipo de solo argiloso, a umidade, a oxigenação e a associação de agentes biológicos responsáveis pela rápida decomposição e degradação da matéria orgânica e o alto teor de óxidos de Fe e Al, que colaboram na estabilização natural dos agregados (Machado; Wadt, 2021). O Latossolo pesquisado da região é altamente intemperizado devido aos fatores que contribui para aceleração do processo, fazendo com que essa relação entre o C não seja tão necessária para estabilização dos agregados. Uma relação negativa também foi identificada no COT, entre resistência à penetração e densidade, apontando que quando há o aumento das concentrações, diminui a tensão e a força exercida pelas raízes, tornando o solo menos compacto. Houve correlação positivas entre COT e porosidade total, macroporosidade e bioporos. Também é possível identificar nas figuras 5 e 6, que as porosidades (total, macroporos e bioporos) apresentam uma relação inversa com a densidade e a resistência à penetração, resultados semelhantes foram encontrados por Mascarenha *et al.* (2017). Nas camadas mais profundas onde o aporte de matéria orgânica é menor, a correlação entre C e os atributos físicos diminui.

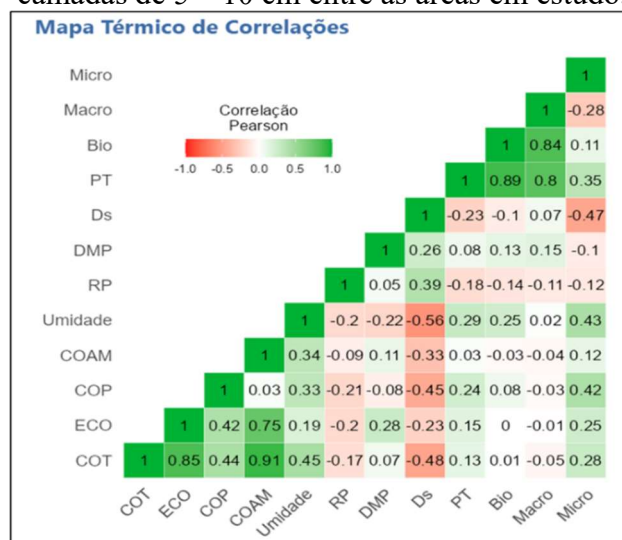
Figura 5 - Resultado da análise de coeficiente de correlação Pearson entre os atributos físicos do solo, estoques de carbono, carbono orgânico total, e as frações granulométricas do carbono entre as camadas de 0 - 5 cm.



Legenda: Cor verde correlação positiva entre os atributos, vermelho correlação negativa, carbono orgânicos total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associados aos minerais (COAM), resistência à penetração (RP), diâmetro médio ponderado (DMP), densidade do solo (DS), porosidade total (PT), bioporos (BIO) macroporos (MACRO), microporos (MICRO), umidade (U).

Fonte: elaborada pela autora (2023).

Figura 6 - Resultado da análise de matriz de correlação entre os atributos físicos do solo, estoques de carbono, carbono orgânico total, e as frações granulométricas do carbono entre as camadas de 5 – 10 cm entre as áreas em estudo.



Legenda: Cor verde correlação positiva entre os atributos, vermelho correlação negativa, carbono orgânicos total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associados aos minerais (COAM), resistência à penetração (RP), diâmetro médio ponderado (DMP), densidade do solo (DS), porosidade total (PT), bioporos (BIO) macroporos (MACRO), microporos (MICRO), umidade (umidade do solo)

Fonte: elaborada pela autora (2023).

### 3.2 CARBONO ORGÂNICO NO SOLO

Os estoques de carbono no solo (ECO) foram semelhantes entre as áreas SRM30 e MN30, com valores de 28,8; 28,1; 22,0 Mg ha<sup>-1</sup> e 33,6; 22,0; 20,0 Mg ha<sup>-1</sup> em MN30, respectivamente, nas camadas 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm. A referida área adota princípios que favorecem a conservação do solo, quando utiliza o sistema de rotação de cultura, cobertura, e a prática de não revolver o solo. Dessa forma, os estoques de carbono, assim como os demais atributos físicos evidenciam que o SRM adotado nesta área tenha ação conservacionista.

As matas nativas MN6 e MN4 apresentaram maiores estoques de carbono no solo (ECO) em relação às áreas SRM em todas as camadas analisadas, com exceção de SRM6 e MN6 na última camada. Isso evidencia a interferência negativa causada pelo uso da terra sobre a quantidade de carbono, especialmente nas fases recentes de implantação (Ferreira, 2015). Destaca-se que o tempo de adoção de práticas conservacionistas pode ser um fator influente em relação os conteúdos de carbono estocado no solo (Calegari, 2020; Li *et al.*; 2020; González-Sánchez *et al.*, 2012).

Os teores de COT na SRM30 e MN30 nas camadas 5 a 10 cm e 10 a 20 cm foram semelhantes, variando de 51,0 a 47,6 g kg<sup>-1</sup> na SRM30 de 68,0 a 45,0 g kg<sup>-1</sup> na MN30. Isso pode estar relacionado com as quantidades de matéria orgânica depositadas no solo, na forma de resíduos agrícolas do ambiente de cultivo e pela serapilheira na MN.

Os teores de COP variaram de 9,0 a 8,8 g kg<sup>-1</sup> na área de 30 anos e 9,0 a 9,2 g kg<sup>-1</sup> para mata nativa, apresentando resultados semelhantes entre os dois sistemas (Tabela 4). Nas demais áreas apresentaram diferenças significativas entre os sistemas, com valores médio de, 11,0 a 4,5 g kg<sup>-1</sup> a de 20,0 a 15,0 g kg<sup>-1</sup> para o sistema de 6 anos e sua respectiva área de referência. A área de com menos tempo de implantação do SRM, foi a que apresentou a maior variação entre área de manejo e o ambiente natural correspondente. Os resultados obtidos entre esses dois sistemas foram: 3,2 a 1,7 g kg<sup>-1</sup> e 20,4 a 9,3 g kg<sup>-1</sup> para a MN. Esses valores contrastantes estão relacionados ao aporte de biomassa no ambiente nativo resultante da serapilheira e principalmente ao tempo de adoção do SRM, evidenciando que quanto maior o tempo de adoção deste sistema, maior será tendência de atingir os valores de C no solo próximo ao de referência.

Para COAM os valores variaram entre 42,0 a 29,4 e 59,0 a 28,0 g kg<sup>-1</sup> e nas camadas mais profundas os resultados foram semelhantes entre o SRM30 e a MN30. No SRM6 os valores de COAM nas camadas superficiais de 0 a 5; 5 a 10 cm variaram entre 36,3 a 31,3 e

foram de 63,6 a 47,7 g kg<sup>-1</sup> para MN, tornam-se mais uniforme na última camada, 24,8 g kg<sup>-1</sup> e 25,9 para MN, com semelhança entre os sistemas.

Em relação ao SRM4 as diferenças foram evidenciadas nas três camadas analisadas para COAM, com valores que variaram entre 38,2 a 23,2 e 65,6 a 30,6 g kg<sup>-1</sup>. Assim como COP, COAM também apresentou maior variação entre o sistema com o menor tempo de implantação do sistema regenerativo e a mata nativa correspondente, sendo o tempo um fator influente para dinâmica nas concentrações de COT e suas frações.

A área de SRM4 apresentou menores teores de COP e COAM em relação à MN nas três camadas, evidenciando as alterações negativas causadas pela mudança do uso da terra. A MUT

Tabela 4 - Estoques de carbono (ECO), carbono orgânico frações granulométricas do carbono orgânico e teores carbono orgânicos nas classes dos agregados.

ÁREAS	Camada	ECO	COT	COP	COAM	COT	
						A ≥ 4,76 mm	BCD ≤ 4,76 mm
		Mg ha <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>				
cm							
SRM30	0-5	28,8	51,0	9,0	42,0	54,1	53,8
MN30	0-5	33,6	68,0*	9,0	59,0*	74,4*	70,5*
CV	0-5	23,6	25,0	40,0	27,0	31,0	26,3
SRM30	5-10	28,1	47,6	10,0	37,7	53,4	48,7
MN30	5-10	22,0	45,0	9,2	35,7	57,4	52,8
CV	5-10	22,6	16,1	46,1	24,7	11,2	12,3
SRM30	10 - 20	22,0	38,0	8,8	29,4	47,0	55,5
MN30	10 - 20	20,0	38,0	9,2	28,8	53,3	51,1
CV	10-20	19,2	16,9	52,6	23,4	16,3	14,7
SRM6	0-5	27,3	47,2	11,0	36,3	54,6	51,8
MN6	0-5	36*	84,2*	20,5*	63,6*	75,0*	78,0
CV	0-5	27,9	26,4	63,4	20,6	21,6	25,7
SRM6	5-10	19,4	38,4	7,1	31,3	48,6	48,3
MN6	5-10	27,1*	64,6*	16,9*	47,7*	54,0	45,8
CV	5-10	26,3	24,7	70,1	30,6	23,3	23,7
SRM6	10 - 20	16,0	30,0	4,6	24,8	44,3	42,8
MN6	10 - 20	19,1	39,8*	15,0*	25,9	45,8	44,2
CV	10-20	21,7	17,0	59,5	19,0	37,6	42,0
SRM4	0-5	27,1	42,0	3,2	38,7	45,8	39,8
MN4	0-5	38,7*	86,1*	20,4*	65,6*	78,1*	77,2*
CV	0-5	22,1	22,5	49,0	31,0	18,1	19,2
SRM4	5-10	25,30	42,0	4,1	37,8	39,8	37,5
MN4	5-10	25,6*	57,9*	10,0*	48,0*	71,3*	73,1*
CV	5-10	26,7	24,7	26,0	30,6	16,5	21,3
SRM4	10 - 20	10,1	25,0	1,7	23,2	34,9	34,4
MN4	10 - 20	20,7*	40,0*	9,3*	30,6*	64,3*	66,4*
CV	10-20	15,6	15,8	56,3	29,0	30,0	32,9

Legenda: A ≥ 4,76 mm = material retido na primeira peneira da análise de estabilidade de agregados. BCD < 4,76 mm = união dos materiais retidos nas primeiras peneiras 2, 00 1,00 e 0,25mm.

\* - indica diferença significativa entre as médias analisadas em cada profundidade, com 5% de significância

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

para formação de novas áreas agrícolas pode afetar negativamente a dinâmica da MO e o acúmulo de COT no solo (Batista, 2017). Calegari *et al.* (2020), afirmam que o processo de restabelecimento do solo acontece de forma gradativa e maiores teores de CO serão obtidos ao longo do tempo. Destaca-se que o carbono orgânico particulado (COP) representa a fração mais sensível ao manejo agrícola, e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM), formado por compostos mais recalcitrantes e com maior permanência no solo (Nanzer, 2019).

Os menores valores de COT, COP e COAM nas áreas SRM6 e SRM4 em relação à MN indicam que as áreas agrícolas necessitam maior tempo de adoção do sistema regenerativo para alcançar uma situação de equivalência com a MN Nanzer (2019), também encontraram valores maiores de estoques de COT e COAM em áreas de ambientes naturais, e segundo eles isso pode ser atribuído à ausência de ação antrópica, que proporciona ambiente favorável para manutenção da matéria orgânica do solo relacionado ao balanço positivo entre entrada e saída.

Pode-se destacar que as frações granulométricas do carbono são importantes indicadores de qualidade em sistemas agrícolas (Bongiorno, 2021). O COP representa a fração mais lábil, com maior disponibilidade para atender as necessidades dos organismos do solo. Quanto ao COAM é o carbono mais recalcitrante, que será disponibilizado para o sistema de forma mais lenta (Oliveira, 2022).

As concentrações de carbono presentes nos macroagregados ( $\geq 4,76$  mm) na camada superficial foram inferiores nas três áreas do SRM em relação a MN (Tabela 6). Os valores obtidos de COT nos seis sistemas foram de 54,1 e 74,4 g kg<sup>-1</sup> respectivamente, para SRM30 e MN30; 54,6 e 75,0 g kg<sup>-1</sup> respectivamente, para SRM6 e MN6 e para SRM4 e MN4 os valores foram respectivamente de 45,8 e 78,0 g kg<sup>-1</sup>. Nesse sentido, a mata nativa possibilita aporte contínuo de matéria orgânica, pela deposição de serapilheira, beneficiando a formação dos magroagregados, com estabilização do C em função da proteção física (Souza, 2022; Caraminan; Fruet; Gasparetto, 2020).

Nos agregados com dimensão inferior a 4,76 mm o comportamento da concentração de carbono orgânico foi semelhante ao observado nos macroagregados ( $\geq 4,76$  mm), em geral, com maiores valores na MN em relação aos SRM. Os teores de carbono orgânico foram ligeiramente menores nessa classe de agregados em relação aos macroagregados

## 4 CONCLUSÕES

Os estoques e frações granulométricas do carbono e os atributos físicos do solo nas áreas com SRM foram em geral inferiores à condição de MN embora os valores encontrados nas áreas agrícolas indicam não haver restrições físicas ao crescimento das plantas.

O maior tempo de manejo regenerativo (30 anos) favoreceu a manutenção dos conteúdos do carbono orgânico, indicando que ao longo do tempo, sistemas regenerativos de manejo mantêm estoques de carbono próximos aos valores encontradas na mata nativa.

## REFERÊNCIAS

AITA, C.; PORT, O., GIACOMINI, S. J. Dinâmica do nitrogênio no solo e produção de fitomassa por plantas de cobertura no outono/inverno com o uso de dejetos de suínos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 30, p. 901-910, 2006.

ALCÂNTARA, F. A. **Atributos do solo e produtividade do milho em sistema agroecológico após adubação verde e fertilizantes orgânicos**. Santo Antônio de Goiás/GO: Embrapa Arroz e feijão, Boletim de pesquisa e desenvolvimento 62, 2022.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. World agriculture towards 2030/2050: **the 2012 revision** ESA. Working paper. Brasília - DF, Brasil: [s.n.].

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. et al. Mapa de classificação climática de köppen para o Brasil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Schweizerbart. DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ASSAD, E. D.; Adaptação e resiliência de sistemas agrícolas às mudanças climáticas locais e eventos extremos: uma revisão integrativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 52. p.72899, 2022.

BATISTA, P.V.G.; et al. Modelagem de perdas de solo distribuídas espacialmente e produção de sedimentos na bacia superior do Rio Grande River Basin - Brazil. **Catena**, v. 157. p. 139-150, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.025>.

BLIGNAUT, J.; K, J.; S, H.; N, N. et al. **Promovendo e avançando a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, regenerativas e de conservação, com um enfoque específico na produção de milho em áreas secas e na pecuária extensiva**. África do Sul, 2015. 19 p.

BONGIORNO, G. Sensibilidade das frações de carbono lábil ao manejo do solo e matéria orgânica e seu potencial como indicadores abrangentes de qualidade do solo em diferentes condições pedoclimáticas na Europa. **Ecological Indicators**, v. 99, p. 38-50, 2019.

BRADY, N. C. WEIL, R.R **Elementos da natureza propriedade do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. p. 685

BRONICK, C. J.; LAL, R. Estrutura do solo e manejo: uma revisão. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

CALONEGO, JC. EA Persistência e liberação de nutrientes da palha de milho, braquiária e labe-labe. **Revista Biociências**. Uberlândia, MG, v. 5, pág. 770–781, 2012. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13885>. Acesso em: 18 set. 2023.

CAMBARDELLA, C. A. Mudanças na matéria orgânica particulada do solo ao longo de uma sequência de cultivo em pastagem. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.

CARAMINAN, L. M.; FRUET, J. G. W; GASPARETTO, N. V. L et al. Estabilidade de agregados de latossolos em floresta estacional semidecidual, Paraná, Sul do Brasil. **Geografia** (Londrina), v. 30, n. 1, 2020. p. 439.

CARNEIRO, M. A. C. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.

CARVALHO, C. A. Atributos físicos em solos cultivados com plantas de cobertura. **Ciência Naturais**, Rio Branco, v. 5, n. 1, p. 1-4, 2020.

CERRI, C. C.; B. **Desafios e oportunidades do sequestro de carbono no solo na América Latina**. Nova York: Haworth, 2006. 47 p.

CHRISTENSEN, B. T. et al. **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC, 1996. 196 p. 97-165.

DAY, P.R. Fracionamento de partículas e análise granulométrica. in: **Métodos de análise de solo**. Sociedade americana de agronomia, v.1, n.1, 1965. p. 545-566. Alegre – RS, 2011. 105f.

DEPARTAMENTO de agricultura dos EUA. **Saúde do solo**. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soils/soil-health>. Acesso em: 11 de maio de 2023.

DERPSCH, R.; F. Por que precisamos padronizar a pesquisa em plantio direto? **Soil And Tillage Research**, v. 137, p. 16-22, 2014.

DE VARES, R. K.; CENTURION, J. F. Ensaio de compactação em latossolo cultivado com milho sob diferentes períodos de adoção de tipos de manejo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 4, p. 499-505, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/228096>. Acesso em: 14 de setembro de 2023.

DOUGHERTY, B. Agricultura regenerativa: O caminho para curar os agros ecossistemas e alimentar o mundo no século XXI. In: **Bolsistas internacionais de agricultura nuffield**. EUA, JA Gil-Ribes 2018. p. 1-46.

EMBRAPA, Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

FAYAD, J.A; ARL, V.; COMIN, J.J.; MAFRA, A.L.; MARCHESI, D. R. **Sistema de Plantio Direto de Hortaliças**. Epagri: Florianópolis, 2019. 431p.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. 2. ed. Lages, 2016. 256p.

FERREIRA, A. O. A produção de grãos em sistema de plantio direto pode restaurar o carbono orgânico do solo aos níveis encontrados em gramíneas naturais em um latossolo subtropical? **Agriculture, Eco systems; Environment**, v. 229, p. 13-20, 2016.

FERREIRA, D. F. Sisvar: Um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.



GEE, G. W.; BAUDER, J. W. et al. Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy: **Soil Science Society of America Journal**, 1986. p. 383-411.

HAWES, C. **Práticas agroecológicas para sustentabilidade de todo o sistema**. Cabi Reviews, v. 5, p. 1-19, 2021.

HICKMANN, C; COSTA, L. M. et al. Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 16, n. 10, p. 1055-1061, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662012001000004>.

HAYNES, R.J. Labile organic matter fractions as centrais components of the quality of agricultural soils: an overview. **Advances in Agronomy**, v.85, p.221-268, 2005.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. Ed., **Methods of soil analysis**. Part 1.. 2nd ed., Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.425-442, (Agronomy Monograph 9)

KOOCH, Y; EHSANI, S; AKBARINIA, M. et al. Stratification of soil organic matter and biota dynamics in natural and anthropogenic ecosystems. **Soil and Tillage Research**, [S.L.], v. 200, p. 104621. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2020.104621>.

LAL, R. Soil erosion and the global carbon budget environment international. **Environment International**, v. 29. p. 437-450, 2016.

LOBELL, D. B, VILLORIA, NB. Reduced benefits of climate-smart agricultural policies from land-use spillovers. **Nat. Sustain.** <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01112-wç7>. v. 6. p. 941–948, 2023.

LOSS, A. et al. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Revista Ciência Rural**, v. 39, n. 4, p. 1067-1072, 2009.

LOSS, A.; B, et al. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1212-1224, 2015.

LOSS, A. Atributos físicos do solo em cultivo de cebola sob sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Colombiana de Ciências Hortícolas**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 105-113, 2017.

LOVATO, T. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 175-187, fev. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832004000100017>.

MACHADO, P. L. O. A.; WADT, P. G. S. **Boas práticas agrícolas: terraceamento**. EMBRAPA Acre, 2021. 9p. Disponível em:

<<https://www.embrapa.br/documents/10180/13599347/ID01.pdf>>. Acesso em: 08 de nov. 2021.

MADARI, B. E. **Fracionamento de agregados: procedimento para uma estimativa compartimentada do sequestro de carbono no solo**. Rio de Janeiro, 2014. p. 10. (Comunicado técnico 22).

MARIANO, V. M. S, Análise da correlação dos índices de estrutura e recursos humanos do serviço veterinário oficial em 2019 e as incidências acumuladas (2017-2019) de doenças de notificação obrigatória em bovinos e equinos no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência Veterinária**, v. 29, n. 2, p. 74-80, 2022.

MCDANIEL, M. D. A diversidade de culturas agrícolas melhora a biomassa microbiana do solo e a dinâmica da matéria orgânica? Uma meta-análise. **Ecological Applications**, v. 24, n. 3, p. 560-570, 2014.

MASCARENHAS, A. R. P. Atributos físicos e estoques de carbono do solo sob diferentes usos da terra em Rondônia, Amazônia Sul-Occidental. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S.L.], v. 37, n. 89, p. 19-31, 2017.

MONTGOMERY, D.R. Soil erosion and agricultural sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 10, n 33, p. 13268–13272, 2007.

MOYER, J. SMITH, A. RUI Y. HAYDEN J. et al. **Agricultura regenerativa e a solução de carbono do solo**. Instituto Rodale. 2020. p. 20.

MUSTO, G. A. Agricultura regenerativa versus agricultura conservacionista: efeitos potenciais na qualidade do solo, produtividade das culturas e economia agrícola em regiões de clima mediterrâneo. **The Journal of Agricultural Science**, p. 1-11, 2023.

NANZER, M. C, Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 18, n. 1, p. 136-145, 2019.

NEIRA, J. et al. Oxygen diffusion in soils: understanding the factors and processes needed for modeling. **Chilean Journal of Agricultural Research**. v. 75, p. 35-44, 2015.

NUNES, M.C.M. Produção de sedimentos pela erosão em entres sulcos em três latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.6, p.541-547, 2011.

OKUMO, J.J. SIBIKO, K.W. MOSE. P.B. OUKO. K.O. et al. Determinants of smallholder farmers' extent of participation in climate-smart agricultural projects in Kakamega County. Ed. 1. **Cogent Social Sciences** . v. 9 p. 327-345, 2023.

OLIVEIRA, G.F. Frações de carbono em agregados do solo em resposta a tipos e doses de fertilizantes orgânicos e mineral. Tese (Doutorado em do Ciência do Solo) - Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. p.120. 2022.

PIX FORCE. **Entenda o que é a qualidade do solo e quais os principais indicadores para garantir uma boa qualidade**, 2021. Disponível em: < <https://pixforce.com.br/qualidade-do-solo>>. Acesso em: 08 de nov. 2021.

PORTAL INMET. **Normais climatológicas do Brasil** – Período: 1991-2020. Disponível em: < <https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 04 de Ago, 2022.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 2002. 568 p.

PRIMIERY, S. et al. Dinâmica do carbono no solo em ecossistemas nativos e plantações florestais em Santa Catarina. **Revista Floresta e Ambiente**. Seropédica - RJ, v. 24, p.19. 2017.

RAMOS, R. R. et al. Perdas de solo e água por erosão hídrica sob chuva simulada em diferentes sistemas de cultivo sob semeadura direta. In: XVIII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA: Novos Caminhos para Agricultura Conservacionista no Brasil. 2010, Teresina – PI. Anais eletrônico XVIII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. EMBRAPA Meio-Norte. 2010. p.1-4. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/204001/1/12972-2010.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2023.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. et al. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência e Ambiente**. v. 27, p.29-48, 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. et al. **Propriedade físicas do solo**. Universidade de Santa Maria, Santa Maria. 2006. p. 18.

ROBERTS, M.; H. Gestão ambiental em terras agrícolas: Análise de custo-benefício de um sistema integrado de cultivo para fornecimento de bens públicos ambientais. **Revista de Gestão Ambiental**. v. 331, n. 1, p. 1-7, 2023.

ROZANE, D. E. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um latossolo vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, v. 26, p.24-32, 2010.

SÁ, T. D. A; KANASHIRO, M; LEMOS, W. de P. et al. Interdisciplinaridade e transdisciplinaridade na pesquisa agrícola amazônica: um desafio para atingir a sustentabilidade. **Revista Agroecossistemas**, [S.L.], v. 6, n. 1, 2014.

SALES, A. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na amazônia legal. **Colloquium Agrariae**. ISSN: 1809-8215. p. 01–15. <https://revistas.unoeste.br/index.php/ca/article/view/1989>

SALTON, J. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32. p.11-21, 2008.

SALTON, J. C. **Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo.**, Dourado, v. 1, n. 1, 2014. p. 01-06. (Comunicado Técnico 198).

SANTA CATARINA. **Guia Prático de Sistema de Plantio Direto**. Disponível em: <[https://www.esalq.usp.br/biblioteca/pdf/Livro\\_Plantas\\_de\\_Cobertura\\_completo.pdf](https://www.esalq.usp.br/biblioteca/pdf/Livro_Plantas_de_Cobertura_completo.pdf)>. Acesso em: 18 de setembro de 2023.

SANTOS, S. F. Utilização de plantas de cobertura na recuperação de solos compactados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 3, p. 82-91. 2000.

SCHREEFEL, L.; B. Como fazer com que as práticas regenerativas funcionem na fazenda: um framework de modelagem. **Sistemas Agrícolas**, [S.L.], v. 198, p. 103371. 2022.

SHREEFEL, L.; S. Agricultura regenerativa - o solo é a base. **Segurança Alimentar Global**, v. 26, p. 100404. 2020.

SILVA, A. P. B. **Influência do tipo de manejo (orgânico e convencional) na matéria orgânica de solos cultivados com citros**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia – IQB, Universidade Federal de Alagoas, UFAL, Alagoas, 2017. 75f.

SILVA, J. C. N, et al. Agregação, carbono e nitrogênio total do solo na integração lavoura-pecuária-floresta na amazônia oriental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 12, p. 837-842, 2018.

SILVA, M. O. **Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável**. v. 7, n. 1, 2021. p. 6853-6875.

SIX, J.; P Estrutura do solo e matéria orgânica I. Distribuição das classes de tamanho dos agregados e carbono associado aos agregados. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64. p. 681 – 689, 2000.

SNYDER, C.; SPANER, D. A sustentabilidade da produção de grãos orgânicos nas Pradarias Canadenses - uma revisão. **Sustentabilidade**, v. 2, n. 4, p. 1016-1034, 2010.

SORIANI, R, S. Eficiência dos penetrômetros de impacto e eletrônico na detecção de compactação do solo. **Revista Terra e Cultura: Cadernos de Ensaio e Pesquisa**. Londrina – PR, v.34, n. especial Ciências Agrárias, 2018. p.202-211.

SOUZA, J.P.de. **Estabilização do carbono das raízes e da biomassa aérea de plantas de cobertura de solos em plantio direto**. Tese (Doutorado universiade do Rio Grade do Sul, Faculdade de Agronomia, Progama de Pós-Graduação em Ciência do solo) Porto Alegre. 2022. p. 94.

SOUZA, S. F. Estabilidade de agregados de solo em uma topos sequência sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife-PE, v.14, n.7, p.4066-4077, 2021.

TEDESCO, M. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre – RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (UFRGS, Boletim Técnico, 5).

TEIXEIRA, P. C. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília – DF: Embrapa, 2017. 577p.

TEIXEIRA, A.N.S. **Sou a natureza, quero falar com você: a reconexão humana e regeneração dos recursos naturais através dos alimentos**. Uberaba, MG, 2023.

TOLLEFSON, J. Alimentação: a fazenda global. **Natureza**, [S.L.], v. 466, n. 7306, p. 554-556, 2010.

TORNQUIST, C. G, et al. Modelagem da dinâmica do carbono orgânico do solo em latossolos de Ibirubá (Brasil) com o Modelo Century. **Pesquisa em Solo e Agricultura**, [S.L.], v. 105, n. 1, p. 33-43. 2009.

TURMEL, M. S.; et al. Bram. crop residue management and soil health: a systems analysis. **Agricultural Systems**, [S.L.], v. 134, p. 6-16. 2015.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.009>.

VELDKAMP, E. Turnover de carbono orgânico em três solos tropicais sob pastagem após o desmatamento. **Journal of the Soil Science Society of America**, v. 58, p. 175-180. 1994.

VIANA, J. H. M. **Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos**. Sete Lagoas/MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. (Comunicado Técnico 154).

VIANA, L. R. A transição da produção convencional para a produção orgânica de grãos de aveia reduziria os impactos ambientais? Um estudo de ACV no nordeste do Canadá. **Journal of Cleaner Production**, v. 349, p. 131344. 2022.

VIANNA, L. F.N. Pesquisa agropecuária: uma análise histórica da produção científica da Epagri. Universidade do Estado de Santa Catarina. **Revista de Ciências Agroveterinárias** Lages, SC, Brasil (ISSN 2238-1171). Universidade do Estado de Santa Catarina. 2022.

WHITE. A.F. O impacto das interfaces bióticas/abióticas na ciclagem de nutrientes minerais em uma cronosequência de solo, Santa Cruz, Califórnia. **Geochim. Cosmoquim. Acta** , 55. p. 62-85. 2012.

WILLETT, W, R. Alimentação no antropoceno: a comissão eat-lancet sobre dietas saudáveis a partir de sistemas alimentares sustentáveis. **The Lancet**, v. 393, n. 10170, p. 447-492. 2019.

WILSON, K. R, et al. Conceituações e perspectivas de diferentes stakeholders sobre agricultura regenerativa revelam mais consenso do que discordância. **Sustainability**, v. 14, n. 22, p. 15261, 2022.

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

YODER, R. E. Um método direto de Análise de agregados do solo e um estudo sobre a natureza física das perdas por erosão. **Agronomy Journal**, v. 28, n. 5, p. 337-351. 1936.