

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Dissertação

Qualidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa

Juliana Vargas Bozzato

Pelotas, 2024

Juliana Vargas Bozzato

Qualidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares

Coorientadoras: Dra. Lilian Terezinha Winckler

Dra. Lizete Stumpf

Pelotas, 2024

B662q Bozzato, Juliana Vargas

Qualidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa [recurso eletrônico] / Juliana Vargas Bozzato ; Vitor Emanuel Quevedo Tavares, orientador ; Lilian Terezinha Winckler, Lizete Stumpf, coorientadoras. — Pelotas, 2024.

51 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

Juliana Vargas Bozzato

Qualidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa

Dissertação de mestrado aprovada, como requisito parcial, para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 11 de dezembro, de 2024

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares (Orientador)
Doutor em Ciências pela Universidade Federal de Pelotas

Profa Dra. Maria Cândida Moitinho Nunes
Doutora em Manejo e Conservação do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Pesquisador Dr. Naylor Bastiani Perez
Doutor em Zootecnia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Agradecimentos

Aos meus familiares, amigos e companheiro, minha sincera gratidão pelo apoio constante, pelas partilhas e pela luz que trouxeram a cada passo desta jornada. Agradeço profundamente aos colegas, professores e orientadores, cuja colaboração reafirmou a importância da construção coletiva e solidária na vida acadêmica.

Estendo minha gratidão àqueles que me auxiliaram diretamente durante os experimentos, principalmente os integrantes do LabBIO, em especial a Istefani, Emerson, Lívia, Stevan, e aos colegas Jaqueline, Charles e Tainara, por seu comprometimento e generosidade no compartilhamento de conhecimentos e esforços.

Ao comitê de orientação, Vitor Tavares, Lilian Winckler e Lizete Stumpf pelos ensinamentos, orientação, receptividade e amizade.

Ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água pelo auxílio proporcionado pelos professores e técnicos.

À Embrapa Clima Temperado e Embrapa Pecuária Sul pelo auxílio de seus técnicos e pesquisadores para com a pesquisa, em especial à Fabia Amorim e Naylor Perez.

À CAPES pela oportunidade de realizar o meu mestrado com bolsa de estudo.

À UFPel pela oportunidade de desenvolver meus estudos, desde a graduação até o presente momento.

Resumo

BOZZATO, Juliana Vargas. **Qualidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa**. Orientador: Vitor Emanuel Quevedo Tavares. 2024. 51 f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

O uso da terra influencia diretamente a capacidade do solo de prover serviços ecossistêmicos. Práticas e sistemas de manejo conservacionistas auxiliam na manutenção dessa capacidade, estimulando ou inibindo características que promovem a sustentabilidade do solo. O estudo objetivou identificar o impacto de diferentes sistemas de usos e manejo, utilizando atributos físicos do solo, além de variáveis representativas da sustentabilidade, como o carbono orgânico total e carbono da biomassa microbiana. A área de estudo é situada na região da Campanha do Rio Grande do Sul, bioma Pampa, com solo predominante Luvisolo Háplico órtico e clima subtropical. Foram avaliados 5 usos do solo: lavoura estreme (LE), lavoura-pecuária (LP), pecuária com campo nativo melhorado (PC), pecuária com tifton (PT) e reserva legal (RL). Também 12 pontos de coleta, onde foram sorteadas 4 repetições em cada terço do relevo. As classes texturais predominantes foram média-siltosa (66,6%), média-arenosa (20%) e média-argilosa (13,3%). Foram determinados atributos de densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, carbono orgânico total, estoque de carbono e carbono, percentual de matéria orgânica do solo e carbono da biomassa microbiana. Para as análises estatísticas os dados foram submetidos ao teste de *Shapiro-Wilk* e de Levene para verificar normalidade e homogeneidade de variância, e posteriormente aplicados *Kruskal-Wallis*/Teste de *Dunn*, *Anova/Tukey HSD* e *Anova de Welch/Games-Howell*, conforme adequação. A análise de componentes principais foi realizada para identificar as interações entre os atributos do solo e usos da terra. A densidade do solo e a microporosidade não tiveram diferença entre os sistemas, considerando a camada de 0,0-0,2m. Na camada 0,0-0,05m, a porosidade total, o carbono orgânico total e o estoque de carbono não tiveram diferença entre os sistemas. O sistema sob Pecuária – Tifton e Pecuária Campo Nativo tiveram os maiores valores de macroporosidade na camada 0-0,05 m, apresentando o primeiro as maiores médias em todas as camadas avaliadas. A porosidade total na camada 0,05-0,10m foi superior no sistema sob Pecuária sob Tifton e Reserva Legal (0,45 e 0,44 m³ m⁻³, respectivamente), e na camada 0,10-0,20m na Reserva Legal (0,42 m³ m⁻³). A Lavoura Estreme teve os maiores teores de carbono orgânico total e estoque de carbono nas camadas de 0,05-0,20m. O carbono da biomassa microbiana foi superior nos sistemas Pecuária Campo Nativo (camada 0,0-0,10m) e Reserva Legal (camada 0,0-0,20m). A análise de componentes principais evidenciou correlações entre os atributos avaliados, com densidade do solo correlacionando negativamente com carbono da biomassa microbiana e porosidade total, e relação positiva entre macroporosidade e carbono orgânico total em Pecuária sob Tifton. A Lavoura Estreme se destacou pelo teor de carbono orgânico total, mas com atributos físicos e biológicos inferiores aos demais usos. A análise de componentes principais, ao relacionar os atributos de densidade, microporosidade e macroporosidade, indicou que a compactação pode estar reduzindo a funcionalidade do solo. O carbono da biomassa microbiana destacou-se como indicador mais sensível às condições do manejo e ambientais.

Palavras-chave: conservação do solo; indicadores biológicos; sustentabilidade.

Abstract

BOZZATO, Juliana Vargas. **Soil Quality in Different Land Use and Management Systems in the Pampa Biome**. Advisor: Vitor Emanuel Quevedo Tavares. 2024. 51 f Dissertation (Master's in Soil and Water Management and Conservation) – Eliseu Maciel School of Agronomy, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

Land use directly influences the soil's ability to provide ecosystem services. Conservation management practices help maintain this capacity by stimulating or inhibiting characteristics that promote soil sustainability. This study aimed to identify the impact of different land use and management systems on soil physical attributes, along with variables representing sustainability, such as total organic carbon and microbial biomass carbon. The study area is located in the Campanha region of Rio Grande do Sul, in the Pampa biome, with the predominant soil being Haplic Luvisol and a subtropical climate. Five land use systems were evaluated: monoculture cropping (LE), integrated crop-livestock (LP), pasture with improved native field (PC), pasture with Tifton (PT), and legal reserve (RL). Twelve sampling points were selected, with four replicates randomly allocated in each third of the terrain. The predominant soil textures were silty-loam (66.6%), sandy-loam (20%), and clay-loam (13.3%). Attributes assessed included density, macroporosity, microporosity, total porosity, total organic carbon, carbon stock, organic matter percentage, and microbial biomass carbon. Statistical analyses were performed using RStudio, where data were tested for normality and homogeneity of variance using the Shapiro-Wilk and Levene tests, followed by Kruskal-Wallis/Dunn, ANOVA/Tukey HSD, and Welch's ANOVA/Games-Howell, as appropriate. Principal Component Analysis (PCA) was conducted to identify the interactions between soil attributes and land uses. Soil density and microporosity did not differ among the systems in the 0.0-0.2 m layer. In the 0.0-0.05 m layer, total porosity, total organic carbon, and carbon stock showed no significant differences across systems. The system under Pasture – Tifton and improved native field had the highest macroporosity values in the 0-0.05 m layer, with the former showing the highest averages across all evaluated layers. Total porosity in the 0.05-0.10 m layer was higher in the Pasture-Tifton and Legal Reserve systems (0.45 and $0.44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectively), and in the 0.10-0.20 m layer, the Legal Reserve system had the highest value ($0.42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Extreme Cropping had the highest total organic carbon and carbon stock in the 0.05-0.20 m layers. Microbial biomass carbon was higher in the Pasture-Native Field (0.0-0.10 m) and Legal Reserve (0.0-0.20 m) systems. Principal Component Analysis revealed correlations among the evaluated attributes, with soil density negatively correlating with microbial biomass carbon and total porosity, and a positive relationship between macroporosity and total organic carbon in the Pasture-Tifton system. Monoculture Cropping stood out for its total organic carbon content but had lower physical and biological attributes compared to other systems. Principal Component Analysis, relating density, microporosity, and macroporosity, suggested that soil compaction might be reducing soil functionality. Microbial biomass carbon proved to be the most sensitive indicator of management and environmental conditions.

Key-words: soil conservation; biological indicators; sustainability.

Lista de Figuras

Figura 1	Mapa de localização da área de estudo, situada entre as cidades de Bagé e Hulha Negra, no Rio Grande do Sul.....	21
Figura 2	Temperatura média e precipitação diária acumulada de Bagé, no período antecedente à coleta, de 01/01/24 a 14/06/24.....	23
Figura 3	Mapa de altimetria, declividade e orientação solar dos diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa.....	25
Figura 4	Delimitação das áreas homogêneas para sorteio dos locais de coleta dos diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa...	25
Figura 5	Locais de coleta nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo no bioma Pampa.....	26
Figura 6	Teste estatístico utilizado para cada variável nas Camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 do solo sob diferentes usos e manejos no bioma Pampa.....	31
Figura 7	Análise de componentes principais considerando 0,00-0,20 m de um solo sob diferentes usos no bioma Pampa.....	40

Lista de Tabelas

Tabela 1	Granulometria de 0,0-0,2 m separada por terço do relevo. O nível A representa a parte mais alta do terreno, o B a parte média e o C a mais baixa.....	28
Tabela 2	Densidade (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) do solo, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, nos diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa.....	33
Tabela 3	Carbono orgânico total (COT), matéria orgânica do solo (MO), estoque de COT (EstC) e carbono da biomassa microbiana (CBM) nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de um solo sob diferentes usos e manejo no Bioma Pampa.....	36

Sumário

1 Introdução.....	9
2 Revisão de literatura.....	12
2.1 Qualidade do solo.....	12
2.2 Atributos físicos do solo.....	14
2.3 Matéria orgânica e outros componentes do ecossistema do solo.....	17
2.4 Conservação do solo e da água.....	19
3 Materiais e Métodos.....	21
3.1 Caracterização da área.....	21
3.2 Descrição do planejamento e definição dos locais de coleta.....	23
3.3 Amostragem e Análise do solo.....	27
3.4 Análise dos dados.....	30
4 Resultados e Discussão.....	32
Conclusões.....	43
Referências.....	44

1 Introdução

O Brasil tem destaque global na produção agrícola e nos últimos quarenta anos, registrou aumento na produtividade impulsionada pela adoção de tecnologias como o sistema de plantio direto, integração lavoura pecuária (ILP), ILP com florestas (ILPF) e agroflorestas (Embrapa, 2018). A adoção desses sistemas exige um custo e um período de adaptação, para que os efeitos positivos comecem a evidenciar a recuperação da degradação causada pelo manejo convencional, em que comumente se utiliza de arados e gradagens. O plantio direto, por exemplo, é considerado como consolidado após 20 anos de condução de suas premissas, as quais contribuem sistematicamente para a melhoria de sua qualidade física e para o sequestro de carbono orgânico (Sekaran; Sagar; Kumar, 2020).

A estrutura do solo é um fator condicionante de sua fertilidade, pois, se as raízes não conseguem se desenvolver adequadamente, consequentemente afetará a absorção de nutrientes disponíveis e necessários. Além disto, a presença de raízes ajuda na manutenção da qualidade física do solo, importante para que a produtividade agrícola não seja prejudicada frente aos eventos extremos (Qiao *et al.*, 2022).

Uma boa estrutura do solo proporciona às plantas boa aeração e adequada infiltração, distribuição e armazenamento de água (Santana *et al.*, 2023). Solos de textura mais arenosa terão maior macroporosidade, e, portanto, maior condutividade e aeração em relação aos solos argilosos (Mello; Silva; Beskow, 2020). A adoção de um manejo mais conservacionista em solos frágeis, como os de textura arenosa, são imprescindíveis para evitar sua degradação durante o seu uso agrícola, considerando a sua maior susceptibilidade à erosão, pela dificuldade em formar agregados e acumular matéria orgânica e a sua baixa

capacidade de reter nutrientes e água, que pode propiciar déficits hídricos e, consequentemente, nutricionais às plantas (Brady; Weill, 2013; Santana *et al.*, 2023).

No contexto atual, adaptar os sistemas agrícolas às mudanças climáticas é urgente e o manejo deve ser adaptado, considerando a resiliência do solo e sua multifuncionalidade, para garantir a sua conservação frente as pressões antrópicas e desafios ambientais (Ludwig; Wilmes; Schrader, 2018). Assim, a condição da superfície e a forma de preparo do solo/vegetação são determinantes para evitar a degradação do solo e promover as condições necessárias para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Entender qual é a capacidade de uso da terra é crucial para selecionar práticas agrícolas adequadas, levando em consideração suas características intrínsecas e fatores ambientais. Implementar práticas que aumentam a retenção de água no solo, podem contribuir para o enfrentamento de eventos extremos, dos quais tendem a aumentar ao longo do tempo (Furtak; Wolińska, 2023).

Sistemas com coberturas vegetais permanentes apresentam condições ambientais favoráveis à vida no solo, em relação aos manejos convencionais (Omer *et al.*, 2023). A vida no solo é indispensável para a sustentabilidade do sistema, uma vez que está vinculada a diversos atributos que influenciam a qualidade do solo (Reeves, 1997). Nesse sentido, determinar a qualidade física do solo em usos e manejos diferentes, pode auxiliar a entender quais são as melhores práticas de manejo para determinado bioma e tipo de solo. Disseminar as informações mais adequadas em uma localidade considerando sua capacidade uso, pode melhorar a produtividade reduzindo os impactos ambientais.

A região da campanha do Rio Grande do Sul, localizada no Bioma Pampa, possui uma tradição consolidada na produção pecuária, sendo um dos principais polos agropecuários do país. Além disso, o clima subtropical favorece a produção de pastagens durante o ano, proporcionando condições ideais para essas práticas. O presente estudo, portanto, se propõe a elucidar os efeitos de diferentes usos e sistemas de manejos na qualidade e saúde do solo, incluindo sua estrutura, fertilidade e capacidade de sustentar a vida microbiana. Dessa forma, é possível reconhecer as práticas que otimizam a conservação do solo,

permitindo estabelecer bases sólidas para agroecossistemas sustentáveis e eficientes, além de ajudar os agricultores, técnicos e pesquisadores a tomarem as melhores decisões.

Portanto, as hipóteses do estudo são as seguintes: a) o uso do solo com pecuária, considerando as entradas e saídas de matéria orgânica desse sistema, tem os maiores teores de carbono orgânico; b) o uso do solo com lavoura tem menor porosidade do solo, considerando que a implementação da semeadura direta é recente, e atributos biológicos quantitativamente inferiores em devida ao sistema de cultivo estreme, demonstrando menor sustentabilidade; c) a densidade do solo em solos sob os usos com pecuária são maiores em relação as áreas de lavoura, considerando o impacto do pisoteio animal; d) a reserva legal tem os maiores teores de carbono da biomassa microbiana, considerando que tem menor intervenção humana no solo.

Dessa forma, o objetivo geral é identificar o impacto dos sistemas de uso e manejo, incluindo o pastejo, o pastejo-lavoura, a lavoura estreme e a reserva legal com vegetação campestre, sob os atributos físicos do solo, alinhado a atributos que representam a sua sustentabilidade, como o carbono orgânico total (COT) e carbono da biomassa microbiana (CBM).

Os objetivos específicos são: a) avaliar a densidade e porosidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo; b) quantificar os teores de COT no solo entre os diferentes sistemas de uso e manejo, visando identificar o impacto na acumulação de matéria orgânica no solo; c) comparar o CBM nos diferentes sistemas de uso e manejo, como indicador sensível da atividade biológica, diretamente relacionado ao manejo.

2 Revisão de literatura

2.1 Qualidade do solo

O solo é corpo tridimensional, formado em interface com a litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera (Brady e Weil, 2013). Seu perfil possui horizontes que se diferenciam de acordo com o clima, organismos, relevo, material de origem e tempo (Jenny, 1941). A alteração de um desses fatores, mantendo os demais constantes, pode conferir características distintas aos solos, influenciando sua dinâmica.

As características morfológicas dos solos resultam de processos de perdas, adições, transferências e transformações de energia e matéria, induzidas pelos fatores de formação. Com o tempo, de forma geral, os solos tendem a melhorar suas características físicas devido a intemperização do material de origem, mas podem se tornar quimicamente pobres devido às perdas das substâncias mais suscetíveis à lixiviação.

O solo é composto por minerais, matéria orgânica, organismos vivos e seu espaço poroso é preenchido com ar e água, variando em proporção. Além de ser um habitat para organismos vivos, o solo é base para funções ecológicas como ciclagem de substâncias orgânicas e inorgânicas, e suporte ao crescimento de plantas, entre outros (Odum e Barret, 2019).

A qualidade do solo refere-se à capacidade do solo de desempenhar funções essenciais dentro de limites específicos do ecossistema e uso da terra. É uma medida abrangente que aborda diversos aspectos que visam garantir a sustentabilidade e a saúde do ambiente agrícola (Doran e Parkin, 1996). Considerando que a qualidade está atrelada à capacidade de desempenhar as suas funções ecológicas, também, a resiliência e a resistência são atributos importantes. A resistência refere-se à capacidade de manter sua qualidade sob efeito de alguma perturbação. Quanto maior for a resistência do sistema, menor

será a perda de sua qualidade ao sofrer impactos negativos externos (Seybold; Herrick; Brejda, 1999). Em relação a resiliência, esse atributo está relacionado à capacidade de se recuperar dessas perturbações, que são comuns na natureza, especialmente em detrimento das mudanças climáticas. Esses dois atributos dependem fortemente da atividade biológica, e podem ser perdidos como resultado de manejos inadequados (Sekaran *et al.*, 2020; Omer *et al.*, 2023).

O comprometimento da sustentabilidade do sistema solo ocorre devido à deterioração das condições ambientais, que afetam o habitat desses organismos e microrganismos do solo, bem como, pela perda de carbono ocasionada pela exposição da matéria orgânica do solo (MOS).

A acumulação e dinâmica da MOS resultam de processos de estabilização e desestabilização, causados por fatores abióticos, bióticos e antropogênicos (Jackson *et al.*, 2017). Esses fatores incluem a quantidade de resíduos, a sua composição química e a comunidade de organismos, o clima, a mineralogia e a posição na paisagem. As interferências antropogênicas também exercem uma influência significativa, principalmente em relação ao uso e manejo da terra.

Para que a biota do solo tenha um habitat favorável para a sua sobrevivência, é necessário evitar a perturbação da estrutura do solo e manter as condições que favoreçam o equilíbrio térmico e a umidade. Portanto, é possível manter essas condições com a adoção de práticas como a semeadura direta, uso de plantas de cobertura, conservação da serrapilheira, entre outros (Serafim *et al.*, 2019; Besen *et al.*, 2024).

Com o objetivo de avaliar a qualidade de um determinado solo, a escolha dos indicadores leva em consideração sua relação com as funções ecossistêmicas e sua viabilidade. Aqui, entendendo funções ecossistêmicas como fluxos de matéria, energia ou informação entre os compartimentos de um ecossistema, como, por exemplo, ciclagem nutrientes, sequestro de carbono e produção de biomassa (DeCock *et al.*, 2023).

Dentre os atributos químicos frequentemente utilizados para determinar a qualidade do solo, destacam-se o teor de matéria orgânica total, o pH e o fósforo disponível, devido à sua importância no desenvolvimento das culturas (Bünemann *et al.*, 2018).

No âmbito dos atributos físicos, aqueles mais comumente considerados incluem a água disponível e a densidade do solo. Esses indicadores são fundamentais para compreender a capacidade do solo de reter água, bem como sua estrutura e porosidade, fatores essenciais para o crescimento saudável das plantas.

Ao incorporar parâmetros químicos e físicos na avaliação da qualidade do solo, é possível obter uma compreensão abrangente de seu estado e sua aptidão para suportar atividades agrícolas e ecossistemas em geral. A estrutura e o teor de carbono orgânico são frequentemente utilizados como indicadores, por serem altamente suscetíveis a alteração devido ao tipo de manejo (Bedolla-Rivera *et al.*, 2023).

O carbono orgânico do solo é um indicador fundamental para a qualidade do solo, pois ele está intrinsecamente ligado aos demais indicadores físicos, químicos e biológicos (Reeves, 1997). A MOS e os argilominerais exercem grande influência na permanência de água no sistema, e na resistência do solo frente ao impacto das gotas da chuva. Esses colóides atuam como agentes cimentantes, também auxiliando na redução de perdas dos sedimentos, e disponibilização de nutrientes.

Esses atributos podem indicar o grau de qualidade do solo em relação ao potencial de suas características. Desse modo, os sinais de degradação desses atributos podem ser diagnosticados por meio de comparação em áreas equivalentes ainda sob mata nativa (Streck *et al.*, 2018) ou sob vegetação campestre nativa, predominante na maior parte da Campanha Meridional do RS.

A qualidade do solo, impulsionada pela conservação, está associada diretamente com o rendimento e qualidade nutricional de grãos, teor de MOS e a lucratividade dos agricultores (Anghinoni *et al.*, 2021). Esses atributos destacam a interconexão entre a saúde do solo, a produção agrícola sustentável e a conservação ambiental, garantindo benefícios econômicos, ambientais e sociais.

2.2 Atributos físicos do solo

Na ciência do solo, a física do solo é a área que trata da modelagem e da medição dos processos físicos no solo, como o movimento de massa ou energia

(Van Lier, 2020). Esses movimentos ocorrem por difusão, fluxo de massa e mudança de fase através de seu espaço poroso, que é preenchido por oxigênio e/ou água, mudando a proporção destes ao decorrer do tempo.

A entrada da água no solo é denominada como infiltração, caracterizada como a passagem de água da superfície para o interior do solo (Tucci, 2001). No ambiente do solo, o fluxo de água é regido pela condutividade hidráulica e pelo potencial total da água no solo (Mello; Silva; Beskow, 2020). Do ponto de vista termodinâmico, o potencial total da água compreende os potenciais de pressão, gravitacional, osmótico e matricial (Reichardt; Timm, 2016).

A curva característica da água no solo, representa a relação do potencial matricial e a umidade da amostra de solo. Ou seja, reflete as forças de gravidade, capilaridade e adsorção, influenciadas pelas propriedades e superfícies das partículas do solo (minerais e orgânicas) (Embrapa, 2017).

O movimento da água no solo ocorre principalmente por processos de transferências inativas (sem energia do metabolismo das plantas), portanto, são os fatores considerados para o estudo da água no solo (Reichardt; Timm, 2016). A água consumida pelas plantas, apesar de insignificante para fins quantitativos do ciclo hidrológico, é fundamental para que possa haver o processo de transpiração, possibilitando a absorção de nutrientes.

As características físicas do solo que exercem maior influência no movimento da água são a porosidade, a textura, o arranjo estrutural das partículas e a umidade atual. Nesse sentido, o tamanho e distribuição das partículas ajudam a compreender a porosidade de determinado solo.

Para determinar a porosidade, coleta-se uma amostra indeformada, representativa das condições *in situ*, que é saturada por capilaridade. Após a saturação completa dessas amostras, diferentes pontos de pressão são aplicados para determinar a porosidade do solo, que é subdividida em macroporosidade, microporosidade e porosidade total (equivalente à soma da macroporosidade e microporosidade). Essas propriedades são fundamentais para avaliar a dinâmica da água e do ar no solo, essenciais para o crescimento das plantas.

Os macroporos ($> 0,08$ mm) são relevantes nos processos de infiltração e redistribuição da água no solo, enquanto os microporos ($< 0,08$ mm)

influenciam o armazenamento e a disponibilidade da água para as plantas (Van Lier, 2020). A água retida nos microporos está disponível para as plantas até um limite, pois essas partículas são retidas com uma tenacidade superior às forças exercidas pela absorção das plantas. O aumento da compactação reduz a macroporosidade, que é definida como um mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para evitar prejuízos às plantas, resultando em uma densidade crítica variável de acordo com a textura do solo (Suzuki *et al.*, 2022).

Os tipos de solo exercem uma influência direta na dinâmica da água no solo, conforme discutido por Santana *et al.*, (2023). Essa complexa interação entre qualidade física, manejo do solo e características específicas do solo ressalta a necessidade de abordagens integradas na avaliação e no monitoramento da qualidade do solo para otimizar o desempenho das culturas (Silva *et al.*, 2021).

Os solos arenosos tendem a ter maior condutividade hidráulica em relação aos argilosos, sendo crucial para a recarga de água subterrânea e redução do escoamento superficial. Em solos argilosos, a água permanece no sistema por mais tempo, mas a capacidade de infiltração é menor (Tucci, 2001).

Em solos degradados pela compactação, a regeneração ocorre de maneira distinta dependendo da textura do solo, mas pode ser impulsionada pela adoção de plantas de cobertura (Salazar *et al.*, 2022). Em culturas permanentes, o uso de plantas de cobertura, associado à manutenção de plantas espontâneas, à utilização de restos de poda para cobertura do solo e ao uso de tratores compactos pode contribuir para evitar a compactação do solo (Ramos *et al.*, 2022).

Em determinadas circunstâncias, a qualidade física do solo (QFS) demonstra ter um impacto mais significativo no rendimento das culturas em comparação com os parâmetros químicos, conforme observado por de Moura *et al.*, (2021). Contudo, é importante destacar que a sensibilidade da QFS pode variar de acordo com diferentes usos e sistemas de manejo do solo (Pinheiro; Teixeira; Kaufmann, 2009).

Os atributos físicos também influenciam o ciclo do carbono no solo. A textura e a estrutura, proporcionadas pela composição mineralógica, são fundamentais para compreender as interações nesses compartimentos. A

redução da área de superfície específica (que auxilia na adsorção da matéria orgânica) pode ocorrer em decorrência da compactação, que altera a estrutura do solo, e pela perda de partículas mais finas por erosão (Rodrigues; Brito; Nunes, 2023).

2.3 Matéria orgânica e outros componentes do ecossistema do solo

A palhada do dossel e os restos culturais são os principais materiais orgânicos depositados no solo, formando a serrapilheira. Esta, juntamente com o solo, constitui o habitat da fauna e comunidade microbiana heterotrófica. O tipo de vegetação e os fatores ambientais irão determinar a quantidade e qualidade dos resíduos, sendo que em climas temperados, a renovação desta camada ocorre em menor intensidade (Moreira; Siqueira, 2006).

A estrutura trófica dos ecossistemas é composta por camadas autotróficas (produtores, ou plantas) e heterotróficas (fagótrofos e saprótofos), com seus componentes incluindo substâncias inorgânicas (utilizadas pelos produtores), compostos orgânicos (gerados pelos produtores), junto ao ambiente físico e os diferentes grupos de organismos (Odum e Barret, 2019).

O processo de decomposição, complexo e ocorrendo em fases, envolve macroorganismos triturando resíduos, seguido pela colonização de microrganismos. A degradação está relacionada à composição química do resíduo (Moreira e Siqueira, 2006). A decomposição transforma substratos prontamente decomponíveis em CO₂ e biomassa, influenciando a estrutura física do solo, formando novos poros e agregados biológicos resistentes ao impacto erosivo das chuvas (Tisdall e Oades, 1982).

A comunidade biológica do solo exerce funções ecossistêmicas cruciais para o ciclo da matéria orgânica no solo, contribuindo para a decomposição, ciclagem de nutrientes e benefícios adicionais, como controle biológico de pragas, melhoria na estrutura do solo e formação de húmus. A riqueza de espécies e grupos funcionais está diretamente relacionada ao aumento da produtividade, considerando o aumento da biomassa (Begon e Townsend, 2023). A diversidade biológica pode promover a seleção de espécies mais eficientes, potencializando os serviços ecossistêmicos e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

No entanto, a produtividade de uma comunidade multiespecífica é limitada, não podendo ultrapassar a produtividade de uma espécie que está em monocultura. Quanto mais simples for o habitat desses organismos, menor serão os nichos (ou funções) disponíveis para se desenvolverem, mais simplificada será a comunidade (Cardoso, 1992).

Essa atividade biológica é mais intensa próxima a superfície do solo, na rizosfera, onde os resíduos de plantas e raízes são fonte de alimento desses organismos (Taylor *et al.*, 2002). A aplicação de agrotóxicos, aração, adubação, e outras práticas agrícolas, podem afetar a dinâmica dessas populações, à medida que causam alterações nas características físicas, químicas e/ou biológicas em seu ambiente.

Nessa zona os estoques de carbono são constantemente renovados, e liberados em forma de dióxido de carbono, através do metabolismo dos organismos, para a atmosfera. A respiração do solo, um processo essencial para o funcionamento dos ecossistemas, tornando o solo um importante regulador, influenciando as trocas gasosas e fluxos de nutrientes nos sistemas solo-vegetação-atmosfera (Moreira e Siqueira, 2006).

Sugere-se uma abordagem na avaliação da MOS considerando seus componentes distintos, como a matéria orgânica particulada e associada aos minerais, conforme proposto por Lavalley; Soong; Cotrufo, (2020). Essas formas de carbono apresentam diferenças químicas, processos de formação, persistência e comportamento no solo.

O carbono originado da decomposição da camada orgânica e da rizosfera passa por processos mediados pelos organismos do solo. Por outro lado, o carbono associado aos minerais resulta da interação de compostos orgânicos solúveis, adsorvendo-se aos minerais presentes no solo.

Cada fração do carbono facilmente decomponível possui características únicas, e a escolha do atributo a ser considerado deve alinhar-se aos objetivos da pesquisa, levando em conta a viabilidade de aplicação do método escolhido. Por exemplo, o carbono oxidável pelo permanganato de potássio e o carbono da matéria orgânica particulada podem ser indicadores mais sensíveis ao manejo agrícola e com pouca variabilidade (Bongiorno *et al.*, 2019)

2.4 Conservação do solo e da água

Os ecossistemas, constituídos por componentes bióticos (formas de vida) e abióticos (água, vento, luz solar, e outros), formam sistemas abertos, termodinâmicos em estado de não-equilíbrio, com trocas constantes de matéria e energia (Odum e Barret, 2019). Quanto maior a organização interna, refletida na diversidade de organismos, maior será a capacidade de resiliência dos ecossistemas frente a fatores externos.

As atividades agrícolas transformam os ecossistemas em agroecossistemas, alterando a dinâmica dos fluxos de matéria e energia (Maluf *et al.*, 2015). O tipo de uso e manejo determina as mudanças no ciclo hidrológico, na biodiversidade, na fauna edáfica e nas proximidades do sistema.

O solo, quando desprotegido, fica vulnerável a fatores como a temperatura e erosão hídrica. A falta de cobertura vegetal compromete o equilíbrio térmico necessário para a reter a umidade, essencial para os processos fisiológicos das culturas e dos organismos presentes (Brady e Weil, 2013; Reichardt e Timm, 2016).

A erosão hídrica, expressa pela Equação Universal de Perda de Solos, é a principal causa de degradação de solos e contaminação das águas superficiais. A relação entre os componentes que potencializam a erosão e os que a dissipam, define a intensidade dos processos erosivos (Chen *et al.*, 2024).

A energia cinética da chuva e da enxurrada causam a desagregação, o transporte e a sedimentação das partículas. A quantidade e velocidade desses agentes determinam a intensidade da perda de solo e nutrientes, sendo a enxurrada responsável pelo transporte de longa distância dessas partículas (Schoers; Scherer; Zehe, 2023).

Por força da gravidade, essas partículas irão para as partes mais baixas da paisagem, seguindo os cursos de rios e finalmente chegando aos reservatórios de abastecimento ou oceano. Quando a quantidade de água na superfície do solo, for superior à capacidade de infiltração, o excedente será convertido em escoamento superficial, e esses processos atuarão com maior intensidade (Tucci, 2001).

Em escala de bacia hidrográfica, a degradação do solo à longo prazo leva à compactação, reduzindo a a infiltração da água no solo e alterando o balanço

hídrico (Mendonça *et al.*, 2009). A redução da rugosidade no terreno diminui a retenção de água na superfície, favorecendo o escoamento superficial (Castilho; Cooper; Juhász, 2011). Isso pode resultar em menor disponibilidade de água ao longo do tempo e aumentar o risco de inundações.

Práticas conservacionistas, como a não mobilização do solo, preservação de resíduos culturais e estruturas que reduzem o escoamento superficial, são essenciais para evitar a degradação do solo (Nath *et al.*, 2023). O revolvimento do solo, monocultura e falta de cobertura do solo são práticas que contribuem para perdas significativas de solo, água e nutrientes, prejudicando tanto o ambiente quanto o rendimento das culturas (Silva *et al.*, 2021).

A contribuição dessas práticas vai além da redução de externalidades negativas, impactando positivamente na produtividade ao aumentar o teor de MOS. Esse aumento na MOS ajuda na capacidade de retenção de água e nutrientes necessários para o desenvolvimento das culturas (Du *et al.*, 2022).

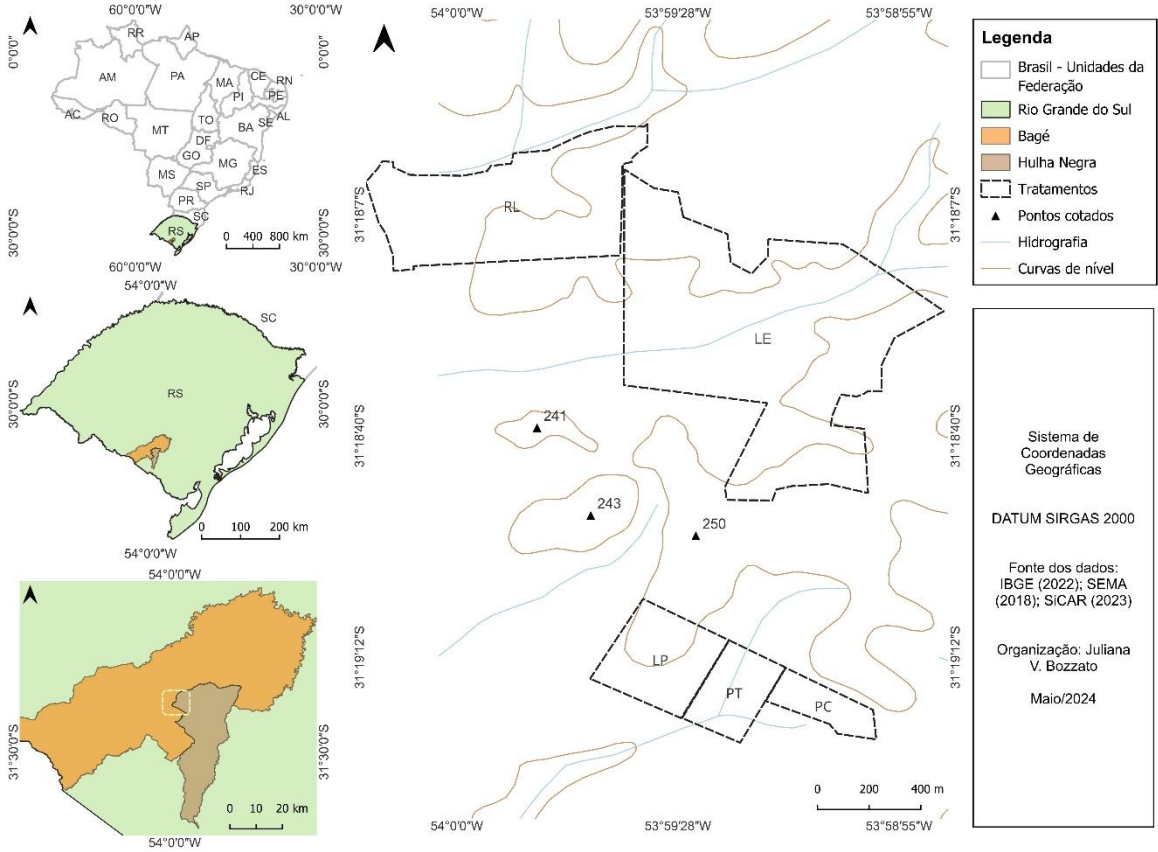
Conciliando a produção agrícola com a conservação do solo, é possível obter maior produtividade e sustentabilidade. Com as práticas conservacionistas é possível restaurar os estoques de carbono no solo, fundamental para manter a sua qualidade e garantir a segurança alimentar (Lal, 2004).

3 Material e Métodos

3.1 Caracterização da área

A área de estudo (Figura 1) é localizada na região da Campanha do Rio Grande do Sul, na fronteira das cidades de Bagé e Hulha Negra, na área experimental da Embrapa Pecuária Sul. A área pertence à Região Hidrográfica da Bacia do Rio Uruguai, na cabeceira (porção nordeste) da bacia hidrográfica do Rio Negro (SEMA, 2021).

Figura 1 - Mapa de localização dos sistemas de usos e manejo no bioma Pampa, situada entre as cidades de Bagé e Hulha Negra, no Rio Grande do Sul



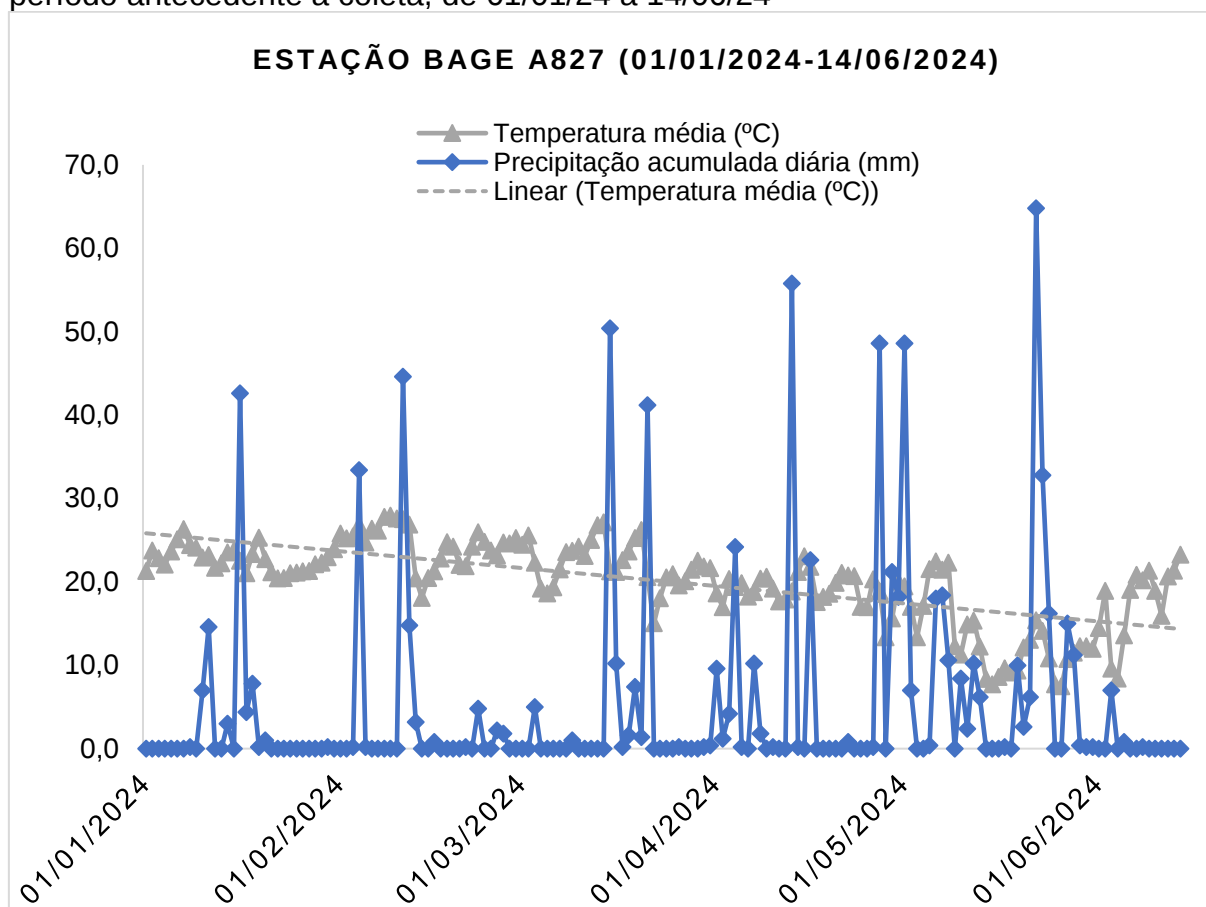
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A região fisiográfica da Campanha está no Bioma Pampa, onde a vegetação predominante é de gramíneas e espécies arbustivas, com alguns fragmentos de Mata Atlântica. Localizada no Sudeste da Depressão Periférica, onde há uma grande variedade de solos, devido a composição litológica sedimentar, que inclui arenitos, siltitos, argilitos e folhelhos. A esmectita na composição mineralógica dos solos dessa região, concede aos solos fertilidade alta, porém com limitações físicas devido a plasticidade dos argilominerais (Streck *et al.*, 2018).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Bagé é Cfa, mesotérmico, tipo subtropical. O ano anterior à coleta foi marcado por períodos de seca, o que impactou a disponibilidade de água até meados de agosto de 2023, seguido de uma sequência de ciclones extratropicais que provocaram chuvas intensas, levando à necessidade de replantio das lavouras. Esses eventos climáticos podem ter influenciado os parâmetros medidos, tanto pela falta de água anterior quanto pelo excesso.

Do início do ano de 2024 até o momento da coleta (14 de junho de 2024), houve um excesso hídrico, com acúmulo de 823,6 mm, durante o período monitorado (Figura 2). A precipitação anual é em média de 1.518 mm, sendo que os déficits hídricos são recorrentes e mais expressivos durante os meses de dezembro e janeiro (Cordeiro; Alves; Rocha, 2020).

Figura 2 - Temperatura média e precipitação diária acumulada de Bagé, no período antecedente à coleta, de 01/01/24 a 14/06/24



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do InMet (2024).

3.2 Descrição do planejamento e definição dos locais de coleta de solo

Foram considerados 5 sistemas que apresentam os seguintes usos:

1) Lavoura Estreme (LE): a área tem histórico de uso com lavoura há mais de vinte anos e, mais recentemente, com pastagem de inverno, cultivada de forma esporádica. Há dois anos, no âmbito do projeto Integra Pampa, foi cedida para manejo de um produtor, exclusivamente com lavoura de grãos, implantada com a técnica de semeadura direta sobre campo nativo infestado por capim-annoni. Antes da coleta, passou por dois cultivos de soja e um de trigo. No momento da coleta a área encontrava-se em pousio.

2) Lavoura Pecuária (LP): área anteriormente infestada com capim-annoni, convertida em 2008 para o sistema ILP. Desde então cultivada com soja

em semeadura direta, em sucessão à pastagem de inverno com azevém ou aveia, com adubação no verão e no inverno, corrigida com calcário.

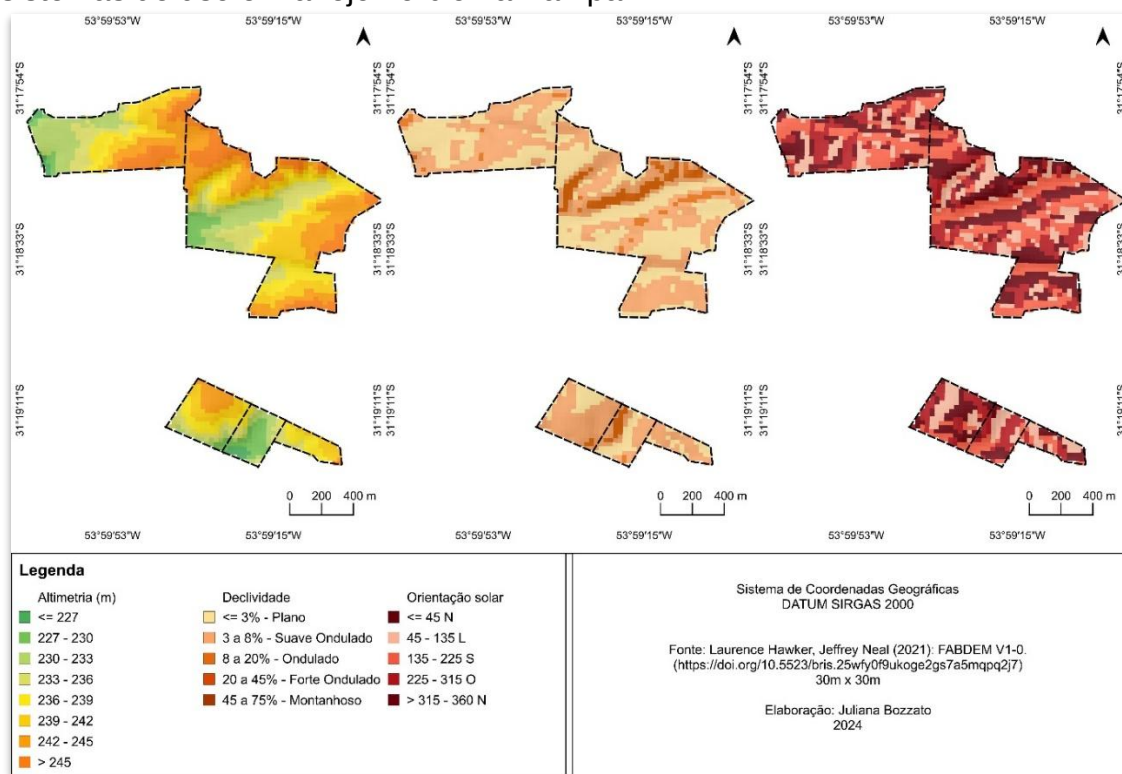
3) Pecuária Campo Nativo (PC): área sob pecuária intensificada, por corretivos e adubos, manejo mais intensivo, com semeadura de espécies de inverno sobre nativas, diferimento na primavera, e esporadicamente usada também para a produção de feno durante o verão.

4) Pecuária sobre pastagem de Tifton 85 (PT): área sob pecuária intensiva com Tifton 85, com aplicação de adubação e corretivos, e diferimento no verão.

5) Reserva legal (RL): área da reserva legal da Embrapa Pecuária Sul com campo nativo manejado sob pastejo esporádico. Considerando que as áreas com vegetação nativa podem auxiliar a identificar efeitos de degradação (Streck *et al.*, 2018), a área de Reserva Legal foi considerada como testemunha.

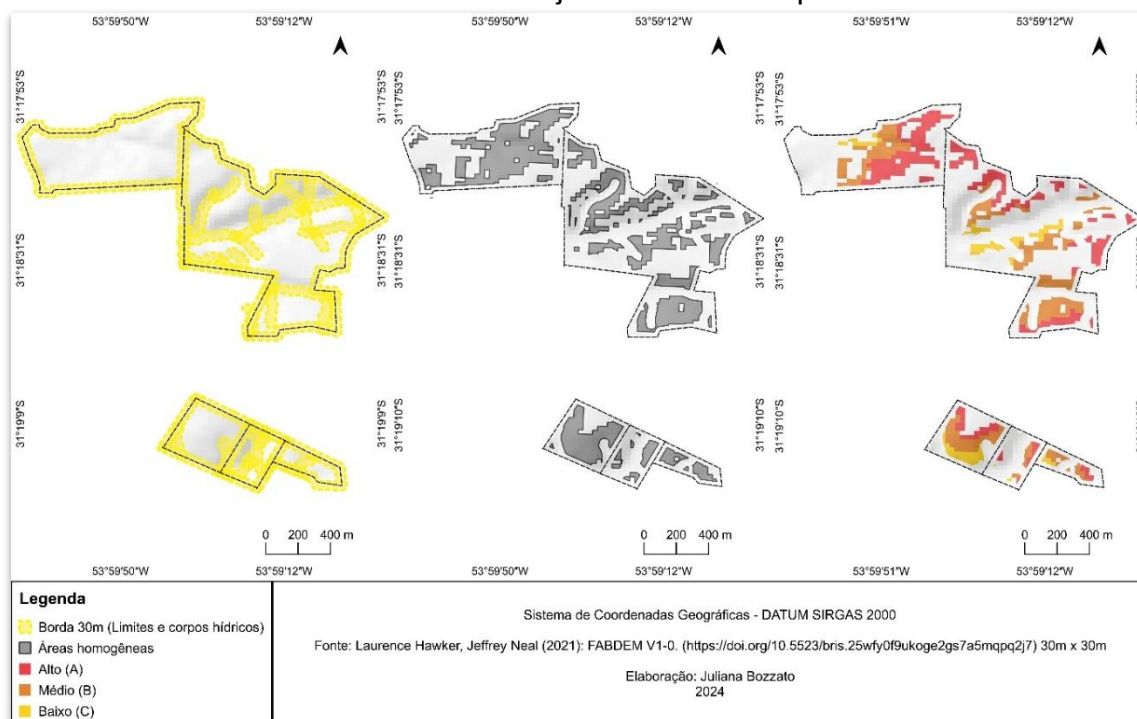
As áreas dos sistemas PC, PT e LP variam entre 7 a 15 ha, enquanto a RL tem cerca de 45,6 ha e LE 95,9 ha, e são pouco homogêneas fisicamente, em relação à característica topográfica (Figura 3). Considerando isso, as áreas foram divididas em 3 níveis de elevação de terreno (alto, médio e baixo), considerando a mesma declividade, e desconsiderando uma borda de 30 metros dos limites dos sistemas e dos corpos hídricos (Figura 4).

Figura 3 - Mapa de altimetria, declividade e orientação solar dos diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 4 - Delimitação das áreas homogêneas para sorteio dos locais de coleta dos diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa

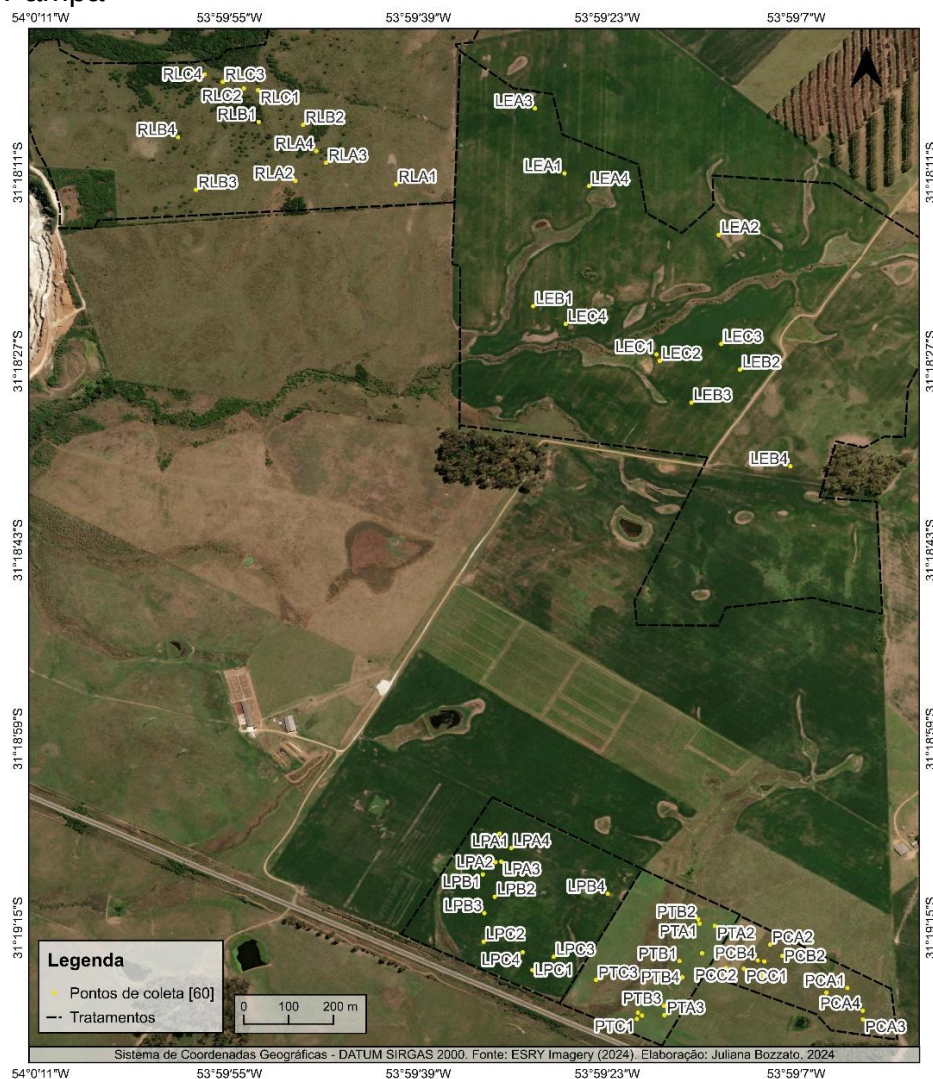


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

As áreas RL e LE são áreas maiores em relação aos outros sistemas, desse modo, buscando a padronização, as áreas foram delimitadas considerando valores de altitude semelhantes aos outros sistemas. Foi considerado o ponto mais alto das parcelas ao sul (mais baixas em relação a RL e LE localizadas ao norte), delimitando as áreas até 250 metros de altitude.

Esses procedimentos foram elaborados visando diminuir a variação provocada por fatores desconhecidos, visando a comparação com áreas fisicamente homogêneas. Dentro destas áreas homogêneas, foram aleatorizados 4 pontos em cada nível, totalizando 12 repetições por sistema, totalizando 60 pontos de coleta.

Figura 5 - Locais de coleta nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo no bioma Pampa



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Para a realização desse levantamento, foram utilizados mapas de declividade, hipsometria e tipo de solos. De acordo com o levantamento de solos na Região do Corede Sul, feito na escala de 1:50.000, os solos que predominam na região são o Luvisolo Háplico Órtico, Vertissolo Indiscriminado e Gleissolo Indiscriminado (Cunha *et al.*, 2006). Esse produto cartográfico, apesar de ser o mais detalhado no RS, está com delimitação homogênea por toda a área de estudo, excluindo a possibilidade de discriminação das áreas em relação a este atributo.

Para obter os dados altimétricos, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) FABDEM (*Forest And Buildings removed Copernicus DEM*) (Hawker *et al.*, 2022), produto que removeu a altura dos prédios e florestas do Copernicus WorldDEM-30 (2010-2014), 1 arco de segundo (~30m). O produto foi escolhido considerando as avaliações já feitas em produtos similares, dos quais o Copernicus e FABDEM mostram resultados de desempenho superiores (Bielski; Lopez-Vazquez; Grohmann; Guth, 2024).

Em cada ponto foram coletadas nas camadas de 0.00-0.05m, 0.05-0.10m, 0.10x0.20m, 3 amostras, das quais, uma porção para análise de COT, uma porção para análise de CBM (para refrigeração até análise laboratorial) e uma amostra indeformada com anel cilíndrico de 5cm de altura. Dessa forma, 540 amostras foram coletadas (5 usos x 3 classes de elevação de terreno x 4 repetições x 3 profundidades x 3 tipos de amostra).

3.3 Amostragem e Análises do solo

Ao longo dos 12 pontos, dentro de cada área, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0,00-0,05m, 0,05-0,10m, 0,10-0,20m, para a determinação da granulometria, da densidade e porosidade, do teor de COT e da CBM. Para a densidade e porosidade foram coletadas 3 subamostras por ponto, totalizando 180 amostras (5 usos x 12 repetições x 3 subamostras). Para a granulometria, os teores de COT e CBM, 6 subamostras foram coletadas por ponto, totalizando 360 (5 usos x 12 repetições x 6 subamostras).

A textura dos solos coletados foi classificada com base no triângulo textural do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Considerando a baixa divergência entre as texturas, ressalta-se a importância do estabelecimento das

áreas homogêneas para o presente estudo, tendo em vista o tamanho da área avaliada e a potencial diversidade de solos.

Em relação à divisão conforme classes de elevação do terreno, 66,6% das amostras pertencem à classe média-siltosa, enquanto a classe média-arenosa representa 20% e média-argilosa 13,3%, apresentando pouca variação nos terços da topografia (Tabela 1).

Tabela 1 - Granulometria de 0,0-0,2 m separada por terço do relevo. O nível A representa a parte mais alta do terreno, o B a parte média e o C a mais baixa.

Uso e manejo	Areia	Silte	Argila	Classe
(g kg ⁻¹)				
Nível A				
Lavoura Estreme	320,3	447,3	232,4	Média-siltosa
Lavoura Pecuária	289,7	466,9	243,4	Média-siltosa
Pastejo Campo	238,6	516,5	244,9	Média-siltosa
Nativo				
Pastejo com Tifton	526,1	268,5	205,4	Média-argilosa
Reserva Legal	569,7	284,9	145,4	Média-arenosa
Nível B				
Lavoura Estreme	535,9	271,6	192,5	Média-arenosa
Lavoura Pecuária	325,5	468,4	206,1	Média-siltosa
Pastejo Campo	368,5	421,0	210,5	Média-siltosa
Nativo				
Pastejo com Tifton	469,7	315,3	215,0	Média-siltosa
Reserva Legal	547,8	302,1	150,1	Média-arenosa
Nível C				
Lavoura Estreme	484,2	269,3	246,5	Média-siltosa
Lavoura Pecuária	436,9	354,3	208,8	Média-siltosa
Pastejo Campo	454,8	332,6	212,6	Média-siltosa
Nativo				
Pastejo com Tifton	471,6	315,2	213,2	Média-siltosa
Reserva Legal	555,4	212	232,6	Média-argilosa

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Para obtenção da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) foi utilizado o método da mesa de tensão, conforme descrito por Teixeira; Bhering (2017). Para isto, foram utilizadas as amostras indeformadas (anéis volumétricos com volume de 86,7 cm³), manuseadas cautelosamente durante os procedimentos. A preparação dos anéis foi realizada com o auxílio de uma faca, para que o volume ficasse rente às bordas, e na parte da borda cortante (inferior) foi adicionado um pano

poroso preso a uma liga de borracha. As amostras foram saturadas por capilaridade por um período de 24 horas.

Após esse período, as amostras foram pesadas para determinar o peso do solo saturado (0 kPa de potencial), e depois colocadas na mesa de tensão, onde foram submetidos a um potencial de 6 kPa para a drenagem da água nos macroporos. Cessada a drenagem, as amostras foram novamente pesadas. Após, as amostras foram encaminhadas para estufa a 105°C para obtenção do peso seco da amostra.

A densidade do solo (D_s) foi calculada considerando a relação entre a massa de solo seco a 105° C e o volume total do solo. A macroporosidade (Ma) foi calculada subtraindo o peso do solo saturado (0 kPa) em relação ao solo drenado a 6 kPa, dividindo seu resultado pelo volume total do solo, enquanto a microporosidade (Mi) foi calculada subtraindo o peso do solo drenado a 6 kPa em relação ao solo seco na estufa. O resultado foi dividido pelo volume total do solo. A porosidade total foi calculada somando-se os valores de Ma e Mi .

Para a determinação do COT utilizou-se o método Walkey; Black (1934), que busca quantificar o carbono no solo em estruturas orgânicas, provenientes da decomposição de animais e vegetais. Nessa análise é somente quantificado as partículas facilmente decomponíveis, em decorrência do uso de dicromato de potássio para a oxidação em via seca e meio ácido, conforme Tedesco (1995).

Com o valor de COT foi possível estimar o teor de matéria orgânica (%) multiplicando pelo Fator de van Bemmelen (1,7274). Com o COT e a D_s foi estimado o estoque de carbono, com correção da DS da RL, que representa a mata nativa, conforme a equação 2:

$$EstCOT = COT * DS * \left(\frac{DS_{RL}}{DS} \right) * e \quad (1)$$

Em que:

EstCOT = estoque de carbono com correção, em determinada profundidade ($g\ kg^{-1}$);

A = teor de carbono na profundidade amostrada ($g\ kg^{-1}$);

DS = densidade do solo para profundidade amostrada em determinado uso ($g\ cm^{-3}$);

DS_{RL} = densidade do solo na área de reserva legal ($g\ cm^{-3}$), e;
e = espessura da camada considerada (cm).

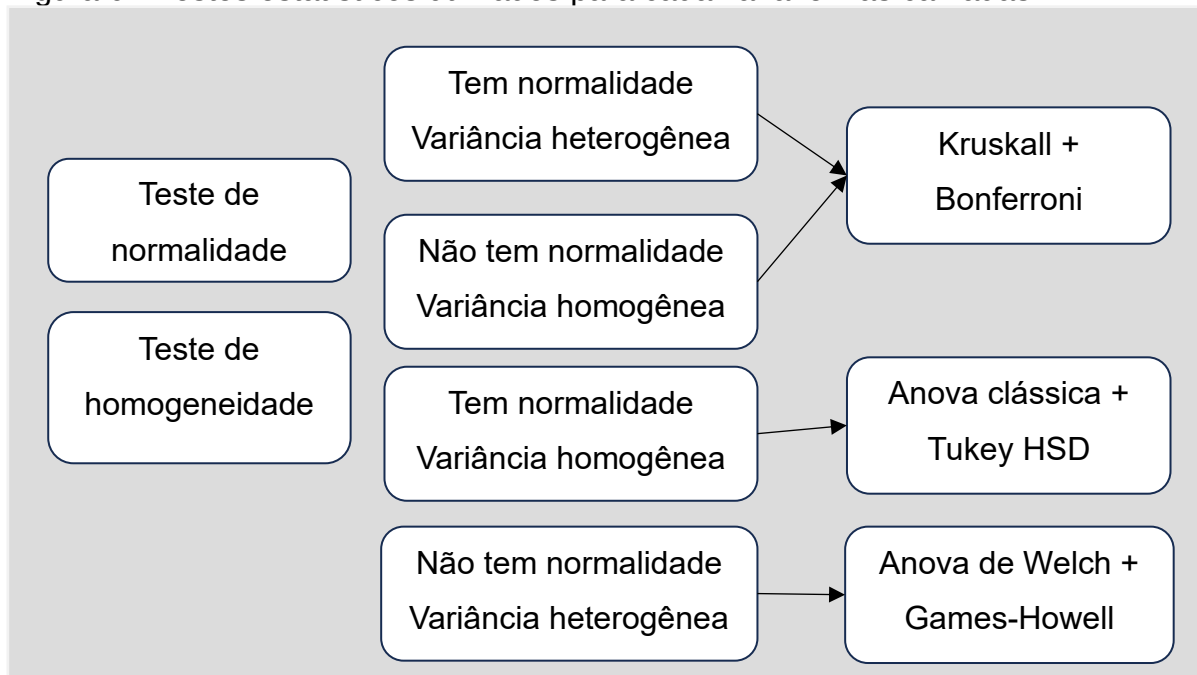
O CBM é um indicador da parte viva da MOS, podendo representar até 3% do C orgânico contido no solo, tendo relação direta com a sua fertilidade (Cardoso, 1992). O método de determinação é de fumigação-extração com base no trabalho de Vance *et al.* (1987), Tate *et al.* (1988), Sparling; West (1988), Brookes *et al.* (1982) e Witt *et al.* (2000), descrita por Evangelista Da Silva; Sabadin de Azevedo; De-Polli (2007). Esse parâmetro possui sensibilidade às alterações provocadas em seu ambiente sendo, portanto, um indicador adequado para o monitoramento da qualidade do solo.

3.4 Análise dos dados

Todas as análises estatísticas foram feitas no RStudio. Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e ao teste de homogeneidade de variância de Levene. A partir do resultado destes dois testes foi possível determinar o teste de significância mais adequado considerando as características das variáveis nas respectivas camadas. Na Figura 6 está descrito os testes correspondentes, de significância e post-hoc, conforme designado pelos testes de normalidade e homogeneidade de variâncias.

Visando atender os objetivos da pesquisa, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP) para reduzir a dimensionalidade dos dados, explorando as relações complexas entre as variáveis. Foram utilizadas para a determinação de padrões e relações entre as variáveis nos diferentes sistemas.

Figura 6 - Testes estatísticos utilizados para cada variável nas camadas



Fonte: Elaborada pela autora (2024)

4 Resultados e Discussão

Os resultados relacionados às variáveis densidade e porosidade do solo são apresentadas na Tabela 2. Não houve diferença significativa para a densidade do solo (Ds) entre os diferentes usos, em nenhuma das camadas analisadas. Contudo, os valores de Ds observados na camada de 0,00-0,05 m, foram entre 1,25 Mg m⁻³ (Pecuária – Campo Nativo) a 1,34 Mg m⁻³ (Pecuária – Tifton), enquanto na camada de 0,05-0,10 m, a Ds foram entre 1,43 Mg m⁻³ (Reserva Legal) a 1,49 Mg m⁻³ (Lavoura Pecuária), e na camada de 0,10-0,20 m, de 1,40 Mg m⁻³ (Reserva Legal) a 1,52 Mg m⁻³ (Pecuária - Tifton).

A ausência de diferenças na Ds entre os sistemas já foi observada em outros estudos realizados no bioma Pampa (Machado, 2024), o que pode ser atribuído tanto à semelhança textural do solo entre os sistemas quanto às características similares no manejo adotado, como o uso de máquinas nos locais. Os sistemas avaliados apresentaram teor de argila semelhante, variando entre 145,4 e 246,5 g kg⁻¹, conforme descrito na Tabela 1. Essa característica está altamente associada à densidade crítica (Reichert *et al.*, 2009).

Em um Argissolo Vermelho distrófico, também localizado na Depressão Periférica, foram identificados valores de densidade crítica na faixa de 1,75 e 1,85 Mg m⁻³, considerando o grau de deformação das raízes (Reinert *et al.*, 2008). Os menores valores encontrados por Reinert *et al.* (2008) na camada 0,00-0,05 m foram de 1,36 Mg m⁻³, e 1,64 Mg m⁻³ na camada 0,05-0,10m, semelhantes aos observados no presente estudo. Ainda assim, é esperado que esse tipo de solo apresente densidade superior aos Luvisolos, considerando que o teor de argila é maior nos Argissolos.

Tabela 2. Densidade (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) de um Luvisolo Háplico Órtico, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, em diferentes sistemas de uso e manejo no bioma Pampa.

Uso e manejo	Ds (Mg m ⁻³)	Ma (m ³ m ⁻³)	Mi (m ³ m ⁻³)	Pt (m ³ m ⁻³)
Camada 1: 0,0-0,05 m				
Lavoura Estreme	1,30 ± 0,09	0,05 ± 0,02b	0,44 ± 0,05	0,49 ± 0,04
Lavoura Pecuária	1,32 ± 0,10	0,07 ± 0,03ab	0,42 ± 0,04	0,49 ± 0,04
Pecuária - Campo Nativo	1,25 ± 0,10	0,07 ± 0,02a	0,45 ± 0,04	0,53 ± 0,04
Pecuária - Tifton	1,34 ± 0,14	0,07 ± 0,01a	0,40 ± 0,11	0,47 ± 0,11
Reserva Legal	1,31 ± 0,10	0,05 ± 0,02b	0,44 ± 0,10	0,50 ± 0,09
<i>p-value</i>	0,01640	0,04528	0,00004	0,00004
Pr(>F)	0,90800	0,27650	0,74930	0,71580
Significância	ns	*	ns	ns
Camada 2: 0,05-0,10 m				
Lavoura Estreme	1,47 ± 0,06	0,06 ± 0,06ab	0,36 ± 0,04	0,41 ± 0,02b
Lavoura Pecuária	1,49 ± 0,05	0,05 ± 0,01b	0,35 ± 0,03	0,40 ± 0,03b
Pecuária - Campo Nativo	1,46 ± 0,07	0,04 ± 0,02b	0,37 ± 0,04	0,41 ± 0,03ab
Pecuária - Tifton	1,46 ± 0,06	0,08 ± 0,02a	0,37 ± 0,04	0,45 ± 0,05a
Reserva Legal	1,43 ± 0,09	0,06 ± 0,02ab	0,37 ± 0,03	0,44 ± 0,03a
<i>p-value</i>	0,13500	0,02500	0,63840	0,00037
Pr(>F)	0,51460	0,89360	0,79760	0,60750
Significância	ns	***	ns	*
Camada 3: 0,10-0,20 m				
Lavoura Estreme	1,49 ± 0,08	0,05 ± 0,03b	0,33 ± 0,04	0,38 ± 0,03b
Lavoura Pecuária	1,48 ± 0,06	0,04 ± 0,02b	0,35 ± 0,02	0,40 ± 0,03ab
Pecuária - Campo Nativo	1,47 ± 0,04	0,06 ± 0,02ab	0,35 ± 0,03	0,40 ± 0,02ab
Pecuária - Tifton	1,52 ± 0,11	0,08 ± 0,03a	0,33 ± 0,03	0,41 ± 0,03ab
Reserva Legal	1,40 ± 0,10	0,05 ± 0,03b	0,35 ± 0,03	0,42 ± 0,03a
<i>p-value</i>	0,03055	0,06895	0,40400	0,23120
Pr(>F)	0,23960	0,84310	0,35820	0,62100
Significância	ns	***	ns	*

p-value > 0,05 = os dados seguem uma distribuição normal. Pr (>F) > 0,05 = as variâncias dos grupos são homogêneas. Significância: ns = não teve significância; * *p* = < 0,05; ** *p* = < 0,01; *** *p* = < 0,001. Fonte: Elaborada pela Autora (2024).

Embora a densidade crítica seja importante para prevenção de impactos na produtividade, devido ao possível impedimento no crescimento radicular, é necessário também considerar os impactos nos aspectos ecológicos. Antes de alcançar esse limite, a infiltração da água no solo e a aeração podem ser prejudicados (Reichert *et al.*, 2009).

Em termos de macroporosidade (Ma), a Tabela 2 mostra que na camada de 0,00-0,5 m os solos sob PC e PT apresentaram um volume significativamente

superior ($0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) aos solos sob RL e LE ($0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Na camada de 0,05-0,10 m, o solo sob PT foi o que apresentou a maior Ma ($0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação a LP e PC ($0,05$ e $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente). Por fim, na camada de 0,10-0,20 m, o maior volume de Ma foi observado novamente no solo sob PT ($0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), enquanto os menores valores foram registrados em LP, LE e RL ($0,05$, $0,05$ e $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente).

Os valores de Ma, independente da camada e sistema, não alcançam o limite considerado adequado para uma boa aeração, que é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Van Lier, 2020; Susuki *et al.*, 2022). Portanto, atenção deve-se dar a melhoria deste atributo físico com adoção de práticas que maximizem e mantenham a abertura de poros de maior diâmetro que facilitem as trocas gasosas e o crescimento radicular das plantas.

Os valores menos críticos de Ma sob o uso de PT nas camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m ($0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; Tabela 3), possivelmente está atrelado ao sistema radicular do Tífton. Ainda assim, o uso de maquinário pode ser o fator em comum que pode estar contribuindo com a compactação do solo nos diversos sistemas.

O volume de microporosidade (Mi) não apresentou diferença entre os usos do solo. Contudo, na camada de 0,00-0,05 m, os valores ficaram entre $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PC) a $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PT). Nas camadas subjacentes, a Mi ficaram entre $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (LP) a $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PC, PT e RL) na camada de 0,05-0,10 m, e de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (LE e PT) a $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (LP, PC e RL) na camada de 0,10-0,20 m (Tabela 2).

Em relação à porosidade total (Pt), a camada de 0,00-0,05 m apresentou o maior volume de poros totais em relação às camadas subjacente (Tabela 2). Contudo, não houve diferença significativa entre os sistemas, mas os valores ficaram entre $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (LE e LP) a $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PC). Na camada de 0,05-0,10 m, o solo sob PT e RL apresentaram maiores volumes ($0,45$ e $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) em relação a LP e LE ($0,40$ e $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente), enquanto na camada de 0,10-0,20 m, o maior volume total de poros foi observada no solo sob RL ($0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e o menor no solo sob LE ($0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

A menor Pt no sistema sob LE pode ser devido ao histórico de monocultura e à compactação acumulada pelo uso de máquinas, mesmo atualmente sendo manejada sob semeadura direta (Barbosa *et al.*, 2020). O

estado do sistema no momento da coleta (pousio) também pode ter contribuído para a compactação do solo. Isso se deve à ausência de cobertura vegetal e os longos eventos de precipitação que a antecederam, favorecendo o rearranjo de partículas.

Sekaran; Sagar; Kumar (2021) identificaram que a mudança do sistema de manejo convencional para semeadura direta levou de quatro a seis anos para observar melhorias significativas nas propriedades físicas e biológicas do solo. Além disso, mesmo com práticas de plantio direto a longo prazo, a ausência de práticas complementares como diversificação de culturas e baixa adição de biomassa, pode limitar a melhoria dos atributos físicos do solo (Santos *et al.*, 2021).

A maior Pt no sistema sob PT pode ser explicada pelas gramíneas perenes, como o Tifton 85, que favorece a formação de micro-habitats e no aumento da biomassa radicular, contribuindo para a qualidade física do solo (Batista *et al.*, 2023). O mesmo pode ser observado no sistema RL, considerando que a vegetação de campo nativo possui um sistema radicular diversificado e adaptado, além de estar submetida a uma menor intervenção antrópica, em comparação ao sistema PT.

Os resultados referentes ao Carbono Orgânico Total (COT) são apresentados na Tabela 3. Na camada de 0,00-0,05 m, os teores de COT não diferiram entre si entre os diferentes usos do solo, ficando entre 23,53 (LE) a 26,64 g kg⁻¹ (PT).

As não diferenças nos teores de COT na camada mais superficial do solo devem-se possivelmente a maior concentração de raízes das plantas, que já são cultivadas a longo período nas áreas, conforme pode-se observar no histórico exposto na metodologia (Lei *et al.*, 2023).

Na camada de 0,05-0,10 m, o solo sob LE apresentou o maior teor de COT (17,63 g kg⁻¹) em relação ao solo sob RL (14,50 g kg⁻¹) e PC (10,98 g kg⁻¹). Na camada de 0,10-0,20 m, o solo sob LE (13,88 g kg⁻¹) novamente apresentou o maior teor, diferindo de todos os demais sistemas, cujos valores variaram de 8,54 g kg⁻¹ (PC) a 12,80 g kg⁻¹ (RL).

Tabela 3. Carbono orgânico total (COT), matéria orgânica do solo (MO), estoque de COT (EstC) e carbono da biomassa microbiana (CBM) nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de um Luvisolo Háplico Órtico sob diferentes sistemas de usos e manejo no Bioma Pampa

Uso e manejo	COT (g kg ⁻¹ solo)	MO (%)	EstC (g kg ⁻¹ solo)	CBM (g kg ⁻¹ solo)
Camada 1: 0,0-0,05 m				
Lavoura Estreme	23,53 ± 5,24	4,06 ± 0,90	153,66 ± 34,06	0,72 ± 0,26ab
Lavoura Pecuária	26,36 ± 3,29	4,54 ± 0,57	171,87 ± 22,30	0,71 ± 0,13ab
Pecuária - Campo Nativo	24,65 ± 7,56	4,25 ± 1,30	161,16 ± 50,11	0,89 ± 0,17a
Pecuária - Tifton	26,64 ± 5,93	4,59 ± 1,02	174,21 ± 39,55	0,55 ± 0,23b
Reserva Legal	26,25 ± 5,67	4,53 ± 0,98	171,38 ± 35,93	0,88 ± 0,09a
<i>p-value</i>	0,005709		0,00552	0,4456
Pr(>F)	0,4476		0,4771	0,03067
Significância	ns		ns	***
Camada 2: 0,05-0,10 m				
Lavoura Estreme	17,63 ± 4,93a	3,04 ± 0,85	125,94 ± 34,97a	0,53 ± 0,16ab
Lavoura Pecuária	12,80 ± 2,54ab	2,22 ± 0,42	92,27 ± 17,44ab	0,45 ± 0,08b
Pecuária - Campo Nativo	10,98 ± 2,42b	1,89 ± 0,42	78,51 ± 17,21b	0,70 ± 0,26a
Pecuária - Tifton	16,55 ± 6,37ab	2,85 ± 1,10	118,33 ± 45,70ab	0,47 ± 0,16b
Reserva Legal	14,50 ± 2,10b	2,50 ± 0,36	103,66 ± 15,12ab	0,66 ± 0,18a
<i>p-value</i>	0,0001069		0,0001111	0,001885
Pr(>F)	0,03205		0,03398	0,3249
Significância	***		***	**
Camada 3: 0,10-0,20 m				
Lavoura Estreme	13,88 ± 5,02a	2,39 ± 0,87	194,62 ± 72,32a	0,44 ± 0,25b
Lavoura Pecuária	11,27 ± 2,12b	1,94 ± 0,37	157,32 ± 28,92b	0,41 ± 0,13b
Pecuária - Campo Nativo	8,54 ± 2,10b	1,47 ± 0,36	119,53 ± 29,75c	0,54 ± 0,18ab
Pecuária - Tifton	12,63 ± 4,06b	2,18 ± 0,70	175,90 ± 54,78ab	0,53 ± 0,17ab
Reserva Legal	12,80 ± 1,93b	2,21 ± 0,33	178,66 ± 26,11a	0,61 ± 0,14a
<i>p-value</i>	0,009273		0,00724	0,001492
Pr(>F)	0,004226		0,002602	0,738
Significância	***		***	**

p-value > 0,05 = os dados seguem uma distribuição normal. Pr (>F) > 0,05 = as variâncias dos grupos são homogêneas. Significância: ns = não teve significância; * = *p* = < 0,05; ** = < 0,01; *** = *p* = < 0,001. Fonte: Elaborada pela Autora (2024).

A concentração inferior no sistema RL pode ser explicado pela textura desses solos (Tabela 1). De forma geral, esse sistema teve os maiores teores de areia, podendo ser esse o fator que contribuiu com menor adsorção do carbono orgânico no solo. Isso foi observado em Machado *et al.* (2024), onde os teores de carbono no solo foram superiores em campos nativos com solos de textura mais fina e menor em solos textura mais arenosa.

Apesar de LE ter apresentado indicadores de menor qualidade em relação aos atributos físicos como Ds e Pt nas camadas 0,05 a 0,20 m (Tabela 2), foi o que apresentou os maiores teores de COT de 0,05 – 0,20 m em relação aos demais usos. Isso pode ser atribuído ao histórico da área, onde teve ocorrência do capimannoni, que apresenta maior biomassa radicular em relação às espécies de campo nativo (Abichequer; Bicca; Medeiros; Saraiva, 2009), assim como o cultivo de trigo no ano anterior a coleta, e a breve contribuição de 2 anos da semeadura direta nesse sistema.

Valores semelhantes de carbono orgânico, em clima semelhante, em um Latossolo Vermelho sob lavoura-pecuária e campo nativo sem pastejo, foram encontrados em Soares *et al.* (2022) na camada 0,00 a 0,05 m ($\pm 26,0 \text{ g kg}^{-1}$). Os fatores que podem estar exercendo maior influência na conservação da matéria orgânica no solo, abrangendo todos os usos avaliados, podem estar relacionados à textura do solo e ao clima da região (Figura 2). A retenção proporcionada pelos argilominerais e a umidade favorecida pelo clima, que influencia a atividade biológica, podem estar contribuindo para a manutenção do carbono orgânico no solo.

Em relação ao teor de MO, a Tabela 3 mostra que os níveis observados na camada de 0,00-0,05 m estão muito próximos a classe alta ($>5\%$), enquanto nas camadas subjacentes, sob a maioria dos usos, os valores são classificados como baixos ($<2,5\%$), de acordo com o Manual de Adubação e Calagem para os estados do RS e SC (SBCS, 2016). A conservação da matéria orgânica no solo semelhante entre o sistema pode estar atrelada ao tipo de solo, condições climáticas, material de origem, organismos do solo e topografia (Rodrigues; Brito; Nunes, 2023).

Essas condicionantes, alinhadas ao tempo de manejo, podem estar contribuindo para os teores mais elevados de matéria orgânica na camada superficial, justamente onde ocorre maior aporte de raízes. As raízes desempenham um papel fundamental na incorporação de carbono ao solo de forma endógena, à medida que liberam compostos orgânicos e inorgânicos por meio da exsudação.

O estoque de carbono (EstC), assim como observado para o COT, não apresentou diferenças significativas entre os usos na camada de 0,00-0,05 m,

ficando com valores entre 153,66 g kg⁻¹ (solo sob LE) a 174,21 g kg⁻¹ (solo sob PT). Por outro lado, na camada de 0,05-0,10 m, o solo sob LE apresentou o maior estoque (125,94 g kg⁻¹) em relação ao solo sob PC (78,51 g kg⁻¹). Por fim, na camada de 0,10-0,20 m, o solo sob o LE (194,62 g kg⁻¹) e sob RL (178,66 g kg⁻¹) tiveram diferenças significativas em relação a LP (157,32 g kg⁻¹) e PC (119,53 g kg⁻¹), conforme aponta a Tabela 3.

O estudo do MapBiomas (2023) revela que, em média, os solos brasileiros têm uma capacidade de estocagem de carbono de aproximadamente 45 t ha⁻¹, sendo que no Pampa essa média é um pouco maior, atingindo 49 t ha⁻¹. Em comparação, solos sob agricultura conseguem estocar uma média de 53 t ha⁻¹, enquanto os campos nativos apresentam 51 t ha⁻¹, evidenciando que, mesmo com a conversão de ecossistemas, ainda é possível alcançar estoques de carbono significativos em sistemas produtivos.

Essa evidência é apoiada por Machado *et al.* (2024), que não encontraram efeitos significativos da conversão de campos para sistemas produtivos, talvez devido ao tempo de adaptação ou à adoção de práticas conservacionistas. Isso demonstra a importância de adoção das práticas conservacionistas para manter o carbono orgânico no solo, e assim manter os sistemas mais resilientes frente as mudanças climáticas.

Em relação ao carbono da biomassa microbiana (CBM), na primeira camada foram observados os maiores valores no solo sob PC (0,89 g kg⁻¹ de solo) e sob RL (0,88 g kg⁻¹ de solo) em relação ao solo sob o PT (0,55 g kg⁻¹ de solo). Na segunda camada, os solos sob PC e RL seguiram apresentando os maiores valores de CBM (0,70 e 0,66 g kg⁻¹ de solo, respectivamente) enquanto o solo sob LP e PT apresentaram os menores valores (0,45 e 0,47 g kg⁻¹ de solo, respectivamente). Na terceira camada, a maior CBM foi observada no solo sob a RL (0,61 g kg⁻¹ de solo), enquanto os menores valores foram observados no solo sob a LP e LE (0,41 e 0,44 g kg⁻¹ de solo), conforme mostra a Tabela 3.

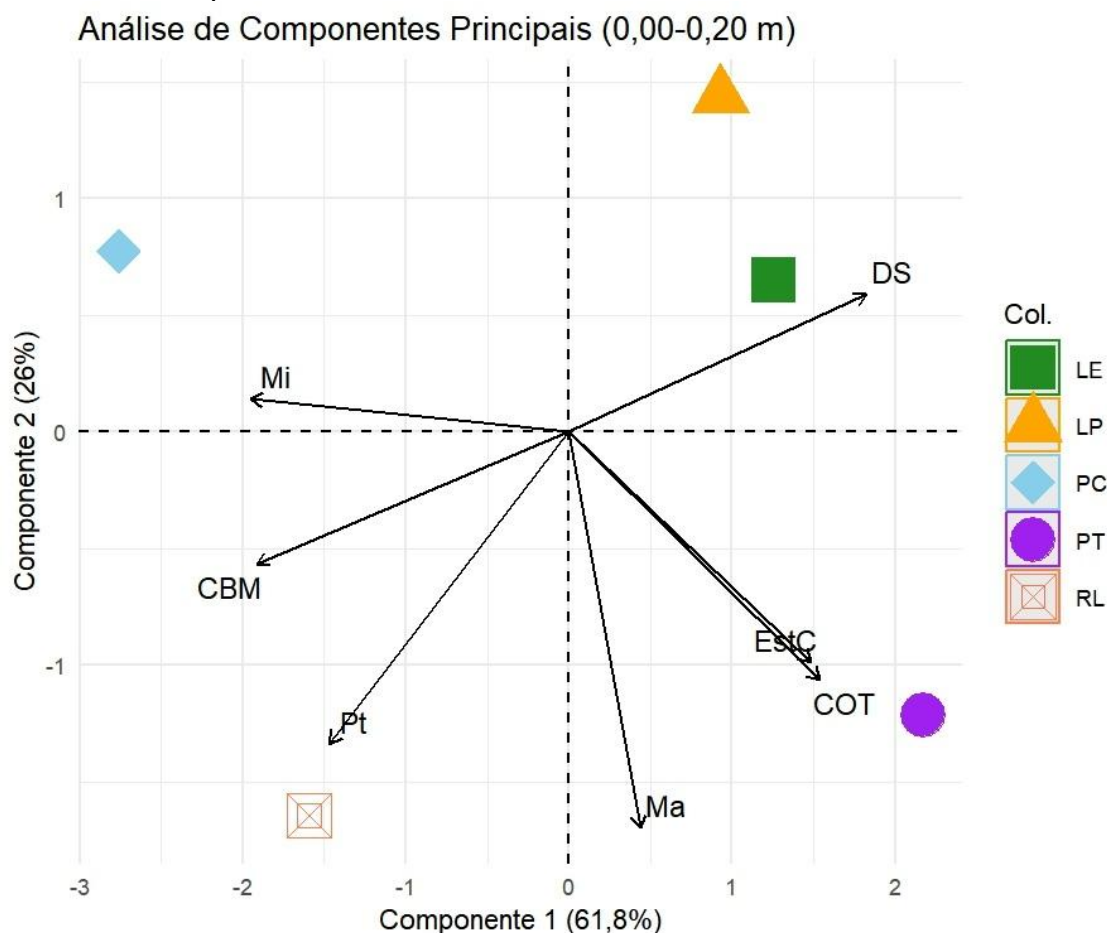
O CBM é reconhecido como um indicador sensível para avaliar o manejo do solo, devido à capacidade dos microrganismos de responder rapidamente às mudanças nas condições físico-químicas do ambiente. Além disso, o CBM desempenha um papel fundamental nos processos ecológicos do solo, como a ciclagem de nutrientes e a manutenção da fertilidade.

A funcionalidade da microbiota do solo, incluindo a abundância e os grupos funcionais microbianos, está diretamente relacionada à diversidade de espécies presentes em diferentes sistemas de uso e manejo. Fatores como o tipo de vegetação, a qualidade dos resíduos orgânicos e a aplicação de insumos, como agroquímicos, influenciam diretamente essa dinâmica. Em particular, práticas como a calagem têm impacto significativo na composição e na funcionalidade da microbiota, devido a alterações na acidez do solo e na disponibilidade de nutrientes, conforme destacado por Tomazelli; Klauberg-Filho; Mendes; Baldissera (2023).

Em relação à análise de componentes principais, conforme observado na Figura 6, os componentes principais 1 e 2 explicaram 61,8% e 26%, respectivamente, da variação no conjunto de dados para a camada de 0,00 a 0,20 m de um solo sob diferentes usos. No primeiro componente, a Ds foi a variável que mais se distanciou da média de forma positiva, indicando que contribui significativamente para esse componente. Observa-se também uma relação positiva entre COT e EstC e uma correlação negativa com CBM e Mi, evidenciada pelo ângulo entre os vetores (CBM a 115° e Mi a 145°). Isso sugere que COT e EstC variam de forma semelhante, enquanto CBM e Mi tendem a variar de maneira oposta. No componente 1, DS está oposta a CBM (180°) e Pt (150°), indicando uma correlação negativa forte com CBM e uma correlação significativa com Pt (Figura 6).

No segundo componente, os pesos mais expressivos foram observados para Ma, Pt e COT/EstC, indicando que essas variáveis têm maior contribuição nesse componente e tendem a variar de forma semelhante. Considerando as relações entre as variáveis e os diferentes usos do solo, maiores valores de Ds foram associados aos solos sob LE e LP, enquanto Pt e Mi apresentaram maiores valores no solo sob RL, Mi no solo sob PC, e COT, EstC e Ma no solo sob PT (Figura 7).

Figura 7 - Análise de componentes principais considerando a camada 0,00-0,20 m de um Luvissole Háplico Órtico sob diferentes sistemas de usos e manejo no Bioma Pampa



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A ACP indicou uma relação forte entre Ds e Mi (Figura 7). Geralmente o aumento da Ds está associado a uma redução da Ma e um incremento da Mi, o que pode ser interpretado como um reflexo do efeito da compactação do solo, condição que compromete a qualidade física (Santos *et al.*, 2021).

Na análise de componentes principais, identifica-se uma correlação positiva entre a Ma e COT, especialmente no uso de PT, possivelmente em função do Tifton. Suas raízes têm potencialidade de alcançar maiores profundidades, contribuindo com a macroporosidade e o COT nas camadas inferiores, por meio dos rizodepósitos (Silva *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2024).

O cálculo de estoque de carbono é fundamental para entender a capacidade do solo de armazenar os resíduos da decomposição da biomassa. No nosso estudo, a análise de ACP, no seu 1º componente, indica o EstC se

correlacionou negativamente com CBM (Figura 6). Isso evidencia que a quantificação de CBM pode não ser o único fator a aumentar o conteúdo de COT no solo.

Muitos outros organismos no solo, como a macrofauna (Sofo; Mininni; Ricciuti, 2020), podem atuar na transformação dos resíduos em COT, bem como impactam diretamente na melhoria da porosidade do solo, o que também impacta positivamente no cálculo do EstC. No presente estudo, a ACP mostrou o impacto positivo da Ma no COT e no EstC (Figura 6).

Embora a CBM tenha apresentado uma relação negativa com EstC, esta variável apresentou uma relação negativa com a Ds e uma relação positiva com Pt (Figura 6). Isto evidencia que este atributo pode estar relacionado a uma distribuição equilibrada de macro e microporos, contribuindo com a retenção de água no solo, e sua aeração, favorecendo os organismos aeróbios.

Considerando todas as variáveis avaliadas, o CBM se mostrou um indicador mais sensível que os demais, considerando os impactos esperados em relação aos manejos. O COT, por exemplo, não indica necessariamente que as propriedades quantificadas correspondam às aquelas esperadas para uma boa fertilidade ou que favoreçam as funções ecossistêmicas desejadas, como a formação de húmus.

A CBM fornece uma visão mais direta sobre o impacto do manejo. Ainda que não conheçamos exatamente quais organismos estão em determinado uso do solo, um maior teor de microrganismos pode estar associado a funções ecossistêmicas que providenciam maior disponibilização de nutrientes as plantas e a transformação da matéria orgânica do solo.

A maior presença de microporosidade nos usos, pode indicar que quando a umidade está em excesso (como ocorreu nos meses anteriores a coleta - Figura 2), a atividade microbiana ocorre predominantemente em condições anaeróbias. Os organismos presentes nessas condições não são tão eficazes na decomposição da matéria orgânica quanto os aeróbios, levando a formação de compostos mais estáveis, contribuindo para o armazenamento de carbono no solo, embora com menor disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se substituir práticas que promovam ausência de cobertura vegetal, como o pousio, uma vez que essas

práticas favorecem a compactação do solo, comprometendo a infiltração da água no solo e a aeração. Em substituição, é indicada a implantação de plantas de cobertura, como gramíneas ou leguminosas, que protegem o solo e melhoram sua estrutura física.

Outro ponto que merece atenção é a minimização do tráfego de máquinas. Recomenda-se planejar operações agrícolas para períodos de menor umidade do solo, reduzindo o risco de compactação, além de priorizar maquinários leves. A adoção de faixas de tráfego controlado também é uma estratégia eficaz, direcionando o tráfego para áreas específicas e protegendo as demais.

Para a melhoria dos atributos biológicos do solo, práticas como o uso de adubação orgânica e a rotação de culturas são fundamentais, pois promovem um ambiente mais adequado para os organismos do solo, aumentando a matéria orgânica e atividade microbiana.

Considerando a presença de argilominerais 2:1 nesses sistemas, a adoção de plantas de cobertura com sistemas radiculares agressivos, como o nabo forrageiro e a braquiária, é especialmente recomendada. Essas espécies auxiliam na redução da compactação natural que ocorre nesses solos, melhorando sua estrutura e favorecendo funções ecossistêmicas e o desenvolvimento das raízes das culturas subsequentes.

Além disso, reforça-se que, para que o sistema plantio direto seja plenamente efetivo, é necessário que ele contemple não apenas a técnica de semeadura direta, e a ausência ou mínima mobilização do solo, mas também manutenção de uma cobertura permanente do solo e a rotação de culturas. Somente com a aplicação conjunta dessas práticas será possível alcançar todos os benefícios esperados, promovendo a sustentabilidade produtiva do sistema.

5 Conclusões

A primeira hipótese não foi corroborada pelos resultados obtidos, considerando que o sistema sob Lavoura Estreme apresentou os maiores teores de carbono orgânico total e, conseqüentemente, o maior estoque de carbono.

A segunda hipótese foi confirmada, uma vez que o sistema sob Lavoura Estreme obteve resultados inferiores com relação aos atributos físicos e atividade microbiana, indicando que o sistema ainda se encontra em processo de recuperação. Nesse sentido, práticas adicionais podem ser implementadas para auxiliar essa recuperação.

Em relação à densidade do solo, não houve diferença entre os sistemas, refutando a terceira hipótese inicial. Entretanto, os atributos físicos, especificamente a macroporosidade e a porosidade total, apresentaram valores mais adequados no sistema de Pecuária sob Tifton.

A quarta hipótese, que previa maior atividade biológica no sistema sob Reserva Legal, foi confirmada. Este sistema, juntamente com o de Pecuária Campo Nativo, apresentou os maiores teores de carbono da biomassa microbiana, evidenciando a importância da diversificação de espécies e da menor intervenção no solo.

A análise de componentes principais, ao relacionar os atributos de densidade, microporosidade e macroporosidade, indicou que a compactação pode estar reduzindo a funcionalidade do solo. O carbono da biomassa microbiana se destacou como indicador mais sensível às condições do manejo e ambientais. Práticas conservacionistas parecem promover um solo mais funcional e resiliente, contribuindo para a conservação de serviços ecossistêmicos.

Referências

- ANGHINONI, Guilherme. *et al.* Conservation agriculture strengthen sustainability of Brazilian grain production and food security. **Land Use Policy**, v. 108, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105591>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- BARBOSA, Tiago da Costa Silva, *et al.* Qualidade física do solo em áreas sob manejo agroecológico e convencional / Physical soil quality in area under agroecological and conventional management. **Brazilian Journal of Development**, 6(7), 48899–48909, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-511> Acesso em: 18 nov. 2024.
- BATISTA, Itaynara *et al.* Soil macrofauna correlations with soil chemical and physical properties and crop sequences under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0230006, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230006> Acesso em: 18 nov. 2024.
- BEDOLLA-RIVERA, Héctor Iván *et al.* Analyzing the impact of intensive agriculture on soil quality: A systematic review and global meta-analysis of quality indexes. **Agronomy**, v. 13, n. 8, p. 2166, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13082166> Acesso em: 18 nov. 2024.
- BEGON, Michael; TOWNSEND, Colin R. **Ecologia: de indivíduos a ecossistemas**. Porto Alegre, ArtMed, 2023
- BESSEN, Marcos Renan; RIBEIRO, Ricardo Henrique; BRATTI, Felipe; LOCATELLI, Joorge Luiz. Cover cropping associated with no-tillage system promotes soil carbon sequestration and increases crop yield in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 242, p. 106162, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2024.106162> Acesso em: 18 nov. 2024.
- BIELSKI, Conrad; LOPEZ-VAZQUEZ, Carlos; GROHMANN, Carlos Henrique; GUTH, Peter. Novel approach for ranking DEMs: Copernicus DEM improves one arc second open global topography. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 62, p. 1-22, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2024.3368015> Acesso em: 18 nov. 2024.
- BONGIORNO, G. *et al.* Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators**, v. 99, p. 38–50, 1 abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008> Acesso em: 18 nov. 2024.
- BRADY, N.; WEIL, R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre-RS: BOOKMAN EDITORA LTDA, 2013.
- BROOKES, Philip Charles; POWLSON, David S.; JENKINSON, David S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology & Biochemistry**,

Oxford, v. 14, n. 4, p. 319-329, 1982. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(82\)90001-3](https://doi.org/10.1016/0038-0717(82)90001-3) Acesso em: 18 nov. 2024.

BÜNEMANN, Else K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 1 maio 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030> Acesso em: 18 nov. 2024.

CARDOSO, E. J. B. N. COORD. **Microbiologia do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992.

CASTILHO, Selene Cristina de Pierri; COOPER, Miguel; JUHÁSZ, Carlos Eduardo Pinto. Influence of crust formation under natural rain on physical attributes of soils with different textures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1893-1905, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600006> Acesso em: 18 nov. 2024.

CHEN, Qiang *et al.* Comparison of the effects of five long-term land use and management practices on runoff, soil erosion, and nutrient loss under natural rainfall in the Mollisol region of Northeast China. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 49, n. 5, p. 1606-1620, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/esp.5789> Acesso em: 18 nov. 2024.

CORDEIRO, Ana Paula Assumpção; ALVES, Rita de Cássia Marques; ROCHA, Mauricio Barbosa da. Caracterização agroclimática de Bagé, RS. **Agrometeoros**, v. 27, n. 2, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i2.26470> Acesso em: 18 nov. 2024.

CUNHA, Noel Gomes; SILVEIRA, Ruy José da Costa.; SEVERO, Carlos Roberto Soares. **Solos e terras do planalto Sul-Rio-Grandense e planícies costeiras**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. Circular técnica, 55, 42 p., 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/862649> Acesso em: 18 nov. 2024.

DECOCK, Eva *et al.* Ecosystem multifunctionality lowers as grasslands under restoration approach their target habitat type. **Restoration Ecology**, v. 31, n. 1, p. e13664, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/rec.13664> Acesso em: 18 nov. 2024.

DE MOURA, Maíse Soares; SILVA, Bruno Montoani; MOTA, Paula; BORGHI, Emerson. Soil management and diverse crop rotation can mitigate early-stage no-till compaction and improve least limiting water range in a Ferralsol. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 1-12, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106523> Acesso em: 18 nov. 2024.

DONAGEMMA, Guilherme Kangussu *et al.* Análise granulométrica. In: TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. rev. e ampl. - Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 95-116. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1085209> Acesso em: 18 nov. 2024.

DORAN, John. W.; PARKIN, Timothy B. Quantitative Indicators of Soil Quality: A Minimum Data Set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for Assessing Soil Quality**. Wisconsin: Soil Science Society of America, v. 49, p. 26–37. 1996. Disponível em:

<https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/21904/Others%20PDFs/Meth%20Assess%20Soil%20Qual%20Chapt%202.pdf> Acesso em: 18 nov. 2024.

DU, Xuan; JIAN, Jinshi; DU, Can; STEWART, Ryan D. Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 2, p. 188–196, 1 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.08.001> Acesso em: 18 nov. 2024.

EMBRAPA. **MANUAL DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE SOLO**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209> Acesso em: 18 nov. 2024.

EMBRAPA. Visão 2030 - o futuro da agricultura brasileira. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1090820> Acesso em: 18 nov. 2024.

EVANGELISTA DA SILVA, Edmilson; SABADIN DE AZEVEDO, Pedro Henrique; DE-POLLI, Helvécio. **Determinação do Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (BMS-C)**. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 98) Seropédica: RJ, p. 6, 2007. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/625010> Acesso em: 18 nov. 2024.

FONTANA, Ademir; CAMPOS, David Vilas Boas de. Carbono orgânico. In: TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3^a ed. ver. e ampl. Brasília, DF. Embrapa. 2017 p. 360-367. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1090820> Acesso em: 18 nov. 2024.

FURTAK, Karolina; WOLIŃSKA, Agnieszka. The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture – A review. **CATENA**, v. 231, p. 1-15, 1 out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107378> Acesso em: 18 nov. 2024.

HAWKER, Laurence *et al.* A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 2, p. 024016, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f> Acesso em: 18 nov. 2024.

JACKSON, Robert B. *et al.* The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls. **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst**, v. 48, p. 419–464, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234> Acesso em: 18 nov. 2024.

JENNY, HANS. Factors of Soil Formation: a system of quantitative pedology. McGraw-Hill, New York. 281 p. 1941. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj1941.00021962003300090016x> Acesso em: 18 nov. 2024.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1097396> Acesso em: 18 nov. 2024.

LAVALLEE, Jocelyn M.; SOONG, Jennifer L.; COTRUFO, M. Francesca. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 1 jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.14859> Acesso em: 18 nov. 2024.

LEI, Xue *et al.* Root exudates mediate the processes of soil organic carbon input and efflux. **Plants**, v. 12, n. 3, p. 630, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12030630> Acesso em: 18 nov. 2024.

LUDWIG, Marie; WILMES, Paul; SCHRADER, Stefan. Measuring soil sustainability via soil resilience. **Science of The Total Environment**, v. 626, p. 1484–1493, 1 jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.043> Acesso em: 18 nov. 2024.

MACHADO, Jessica Maciel *et al.* Soil carbon stocks as affected by land-use changes across the Pampa of southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. e0230124, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230124> Acesso em: 18 nov. 2024.

MALUF, Henrique José Guimarães Moreira *et al.* Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1690-1702, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140658> Acesso em: 18 nov. 2024.

MapBiomass, “Mapeamento anual do estoque de carbono orgânico do solo no Brasil 1985-2021 (coleção beta)”, Disponível em: <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/DHAYLZ>, MapBiomass Data, V1”, 2023. Acesso em: 18 nov. 2024.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; BESKOW, S. Hidrologia de Superfície: princípios e aplicações. **2ª Edição. 531p. Editora UFLA**, 2020.

MENDONÇA, L. A. R. *et al.* Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 89–98, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000100010> Acesso em: 18 nov. 2024.

MOREIRA, F. M. DE S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006.

NATH, Chaitanya Prasad *et al.* Pulse crop and organic amendments in cropping system improve soil quality in rice ecology: Evidence from a long-term experiment of 16 years. **Geoderma**, v. 430, 1 fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116334> Acesso em: 18 nov. 2024.

ODUM, Eugene, P.; BARRET, Gary W. **Fundamentos de Ecologia** – Tradução da 5ª edição norte-americana, Cengage Learning Brasil, 2019.

OMER, Mohammed; IDOWU, O. John; PIETRASIAK, Nicole; VANLEEUEWEN, Dawn. Agricultural practices influence biological soil quality indicators in an irrigated semiarid agro-ecosystem. **Pedobiologia**, v. 96, p. 1-9, 1 mar. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pedobi.2022.150862> Acesso em: 18 nov. 2024.

PINHEIRO, Adilson; TEIXEIRA, Lizandra Poeta; KAUFMANN, Vander. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Revista Ambiente e Agua**, v. 4, n. 2, p. 188–199, 2009. Disponível em: <https://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/211/343> Acesso em: 18 nov. 2024.

QIAO, Lei *et al.* Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 6, p. 574–580, 1 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01376-8> Acesso em: 18 nov. 2024.

RAMOS, Mariana Fernandes; ALMEIDA, William Roger da Silva; AMARAL, Rodrigo de Lima do; SUZUKI, Luis Eduardo Akiyoshi Sanches. Degree of compactness and soil quality of peach orchards with different production ages. **Soil and Tillage Research**, v. 219, p. 105324, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105324> Acesso em: 18 nov. 2024.

REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 43, n. 1–2, p. 131–167, 1 nov. 1997. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00038-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00038-X) Acesso em: 18 nov. 2024.

REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. Água e sustentabilidade no sistema solo-planta-atmosfera. **Série sustentabilidade/Alindo Philippi Jr., coordenador) Barueri, SP: Manole**, 2016.

RODRIGUES, Cristina I. Dias; BRITO, Luís Miguel; NUNES, Leonel JR. Soil carbon sequestration in the context of climate change mitigation: A review. **Soil Systems**, v. 7, n. 3, p. 64, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030064> Acesso em: 18 nov. 2024.

SALAZAR, María Paz *et al.* Capacity and Intensity Indicators to evaluate the effect of different crop sequences and cover crops on soil physical quality of two different textured soils from Pampas Region. **Soil and Tillage Research**, v. 217, p. 105268, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105268> Acesso em: 18 nov. 2024.

SANTANA, Monna Lysa Teixeira *et al.* Interactions between land use and soil type drive soil functions, highlighting water recharge potential, in the Cantareira System, Southeast of Brazil. **Science of The Total Environment**, p. 1-13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166125> Acesso em: 18 nov. 2024.

SANTOS, Rafael S. *et al.* Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. **Geoderma**, 400, 115149, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115149> Acesso em: 18 nov. 2024.

SBCS - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul: Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. Disponível em: https://www.sbcs-nrs.org.br/docs/Manual_de_Calagem_e_Adubacao_para_os_Estados_do_RS_e_de_SC-2016.pdf Acesso em: 18 nov. 2024.

SEKARAN, Udayakumar; SAGAR, Kavya Laxmisagara; KUMAR, Sandeep. Soil aggregates, aggregate-associated carbon and nitrogen, and water retention as influenced by short and long-term no-till systems. **Soil and Tillage Research**, v. 208, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2020.104885> Acesso em: 18 nov. 2024.

SERAFIM, Milson Evaldo *et al.* Reference values and soil quality in areas of high soybean yield in Cerrado region, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104362, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104362> Acesso em: 18 nov. 2024.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, v. 164, n. 4, p. 224–234, abr. 1999. Disponível em: <https://journals.lww.com/soilsci/toc/1999/04000> Acesso em: 18 nov. 2024.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de planta na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997.

SILVA, Lucas de Castro Moreira da *et al.* Ecological intensification of cropping systems enhances soil functions, mitigates soil erosion, and promotes crop resilience to dry spells in the Brazilian Cerrado. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 9, n. 4, p. 591–604, 1 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.006> Acesso em: 18 nov. 2024.

SILVA, Eudocio R. O. da *et al.* Soil organic matter fractions and multivariate analysis in the definition of pasture management zones. **Engenharia Agrícola**, v. 42, n. 6, p. e20220099, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n6e20220099/2022> Acesso em: 18 nov. 2024.

SOARES, Bruna Possobon *et al.* Long-term effects of grazing intensities on soil aggregation and organic matter in a no-tilled integrated soybean-cattle system. **Soil**

Security, v. 6, p. 100028, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100028> Acesso em: 18 nov. 2024.

SOFO, Adriano; MININNI, Alba Nicoletta; RICCIUTI, Patrizia. Soil macrofauna: A key factor for increasing soil fertility and promoting sustainable soil use in fruit orchard agrosystems. **Agronomy**, v. 10, n. 4, p. 456, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10040456> Acesso em: 18 nov. 2024.

SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial- C - calibration in situ using microbial respiration and ¹⁴C-labeled cells. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 20, n. 3, p. 337-343, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/0038-0717%2888%2990013-2> Acesso em: 18 nov. 2024.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2018.

TANG, Yixuan *et al.* The Dynamics of Soil Macropores and Hydraulic Conductivity as Influenced by the Fibrous and Tap Root Systems. **Agriculture**, v. 14, n. 10, p. 1676, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture14101676> Acesso em: 18 nov. 2024.

TATE, K. R.; ROSS, D. J.; FELTHAM, C. W. A direct extraction method to estimate soil microbial- C - effects of experimental- variables and some different calibration procedures. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 20, n. 3, p. 329-335, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90013-2) Acesso em: 18 nov. 2024.

TAYLOR, J. P.; WILSON, B. MILLS, M. S.; BURNS, R. G. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, n. 3, p. 387–401, 1 mar. 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00199-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00199-7) Acesso em: 18 nov. 2024.

TEDESCO, Marino José. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Ufrgs, 1995.

TEIXEIRA, Wenceslay Geraldês; BHERING, Silvio Barge. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. rev. e ampl. - Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 34-46 Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209> Acesso em: 18 nov. 2024.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x> Acesso em: 18 nov. 2024.

TOMAZELLI, Daniela; KLAUBERG-FILHO, Osmar; MENDES, Sandra Denise Camargo; BALDISSERA, Tiago Celso. Pasture management intensification shifts the soil microbiome composition and ecosystem functions. **Agriculture, Ecosystems &**

Environment, v. 346, p. 108355, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2023.108355> Acesso em: 18 nov. 2024.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6) Acesso em: 18 nov. 2024.

VAN LIER, Quirijn De Jong. **Física do Solo baseada em processos**. Piracicaba: Edição do autor, p. 413, 2020.

VIANA, João Herbert Moreira; DONAGEMMA, Guilherme Kangussu; TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes. Umidade residual e fator "f". In: TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. rev. e ampl. - Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 31-32. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209> Acesso em: 18 nov. 2024.

Walkley, A. J. and Black, I. A. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. **Soil Science** v 37, p 29-38. 1934.

WITT, C.; GAUNT, J. L.; GALICIA, C. C.; OTTOW, J. C. G.; NEUE, H. U. A rapid chloroform-fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon and nitrogen in flooded rice soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 30, n. 5-6, p. 510-519, mar. 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s003740050030> Acesso em: 18 nov. 2024.