

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



Tese

**Caracterização do carbono orgânico em Neossolos Litólicos e Regolíticos sob
diferentes usos no bioma Pampa**

Luís Eduardo Torma Burgueño

Pelotas, 2026

Agradecimentos

Quero agradecer ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) pela concessão da licença remunerada, possibilitando meu afastamento para o desenvolvimento deste doutorado. No âmbito da instituição, agradeço especialmente à servidora Juliana Albino Rosa, da Coordenação de Educação Corporativa (Ceduc), por sua sensibilidade, acolhimento e palavras de estímulo, num dos momentos mais difíceis deste processo.

Quero agradecer à professora Maria Cândida Moitinho Nunes, coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água (Macsa), por sua sensibilidade, direcionamento e pronto atendimento a todas as demandas apresentadas ao longo desse período.

Agradeço imensamente à professora Jakeline Rosa de Oliveira, por sua proposta de estudos assertiva e orientação segura, sem a qual essa tese não teria sido concluída em tempo tão exíguo. Nesta mesma linha, quero agradecer ao professor Luiz Fernando Spinelli Pinto, que me acompanhou desde o início do doutorado e coorientou este trabalho, por sua generosidade e espírito investigativo, dando-me sempre a liberdade necessária para explorar diferentes âmbitos da minha curiosidade científica.

Quero agradecer a todos os membros da banca examinadora – professores José Miguel Reichert, Pablo Miguel e Francis Henrique Tenório Firmino – por suas valiosas correções e sugestões, que contribuíram significativamente para a versão final desta tese.

Quero agradecer profundamente à professora Lizete Stumpf, por seu acolhimento fraterno e espírito acadêmico, bem como por sua confiança na minha capacidade e por proporcionar oportunidades desafiadoras para as explorar, ampliando minhas habilidades investigativas.

Ao professor Pablo Miguel quero expressar minha elevada gratidão por provocar e instigar minha curiosidade sobre a formação dos Neossolos do Escudo Sul-Rio-Grandense, o que contribuiu imensamente para os resultados desta tese. Além disso, agradeço-lhe por manter, juntamente com o professor Spinelli, um acervo tão rico de

perfis de solo, de onde emergiu esta pesquisa, preservando um importantíssimo repositório dos solos regionais.

Quero expressar minha profunda gratidão aos servidores do Departamento de Solos: à Dra. Rosimeri Damasceno Trecha, técnica do Laboratório de Química dos Solos, onde passei muitos meses em meio a reagentes e análises, por sua sempre atenciosa supervisão; ao “seu Paulo” (Paulo Luís da Luz Antunes), técnico do Laboratório de Física do Solo, por sua colaboração na execução das análises físicas; aos técnicos do Laboratório de Análises de Rotina, Elmar Nachtigall Manke (o “Gringo”) e Sérgio Luís Fonseca Machado, pela execução de diversas análises que compõem esta pesquisa.

Aos colegas do Macsa: ao Gabriel Henrique das Dores, por sua colaboração nas determinações microbiológicas; e ao Adão Pagani Junior e ao Dr. Marcel Thomas Pereira, pela ajuda nas coletas de campo das amostras de solo.

Quero também expressar minha gratidão à minha companheira, Clause Piana, por estar ao meu lado ao longo desta jornada, testemunhando as alegrias e angústias desse caminhar, dando-me o apoio e incentivos necessários à consecução desta tese.

Por fim quero agradecer a todos e a todas que, mesmo não citados nominalmente, estiveram presentes de várias formas nesta trajetória: aos colegas, expressei minha profunda alegria por compartilharmos estes momentos de grande aprendizado; aos professores, manifesto minha mais elevada admiração pela nobreza de dedicarem suas vidas à docência e à pesquisa científica – não há missão mais elevada neste mundo.

AMDG

À Dulcinéia, *in memoriam*

*Foi o melhor dos tempos, foi o pior dos tempos;
foi a idade da sabedoria, foi a idade da insensatez;
foi a época da crença, foi a época da descrença;
foi a estação da luz, foi a estação das trevas;
foi a primavera da esperança, foi o inverno do desespero...*

Charles Dickens

Luís Eduardo Torma BURGUEÑO

**Caracterização do carbono orgânico em Neossolos Litólicos e Regolíticos sob
diferentes usos no bioma Pampa**

Tese 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 Doutor em Ciências.

Orientadora: Profa. Dra. Jakeline Rosa de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Spinelli Pinto

Pelotas, 2026

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

B954c Burgueño, Luís Eduardo Torma

Caracterização do carbono orgânico em Neossolos Litólicos e
Regolíticos sob diferentes usos no bioma Pampa [recurso eletrônico] /
Luís Eduardo Torma Burgueño ; Jakeline Rosa de Oliveira, Luiz Fernando
Spinelli Pinto, orientadores. — Pelotas, 2026.
282 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e
Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel,
Universidade Federal de Pelotas, 2026.

1. MOP. 2. MOAM. 3. Atividade enzimática. 4. Análise Isotópica. 5.
FTIR. I. Oliveira, Jakeline Rosa de, orient. II. Pinto, Luiz Fernando Spinelli,
orient. III. Título.

CDD 631.417

Luís Eduardo Torma BURGUEÑO

Caracterização do carbono orgânico em Neossolos Litólicos e Regolíticos sob diferentes usos no bioma Pampa

Tese 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 Doutor em Ciências.

Data da defesa: 21 de julho de 2026

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Jakeline Rosa de Oliveira (Orientadora)
Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. José Miguel Reichert
Doutor em Agronomia pela Purdue University, EUA

Prof. Dr. Francis Henrique Tenório Firmino
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Pablo Miguel
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

Pelotas, 2026

Resumo

BURGUEÑO, Luís Eduardo Torma. **Caracterização do carbono orgânico em Neossolos Litólicos e Regolíticos do Bioma Pampa, Brasil**. Orientadora: Jakeline Rosa de Oliveira. 2026. 282f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2026.

Mudanças no uso da terra influenciam a dinâmica e a estabilidade da matéria orgânica do solo (MOS). Entretanto, as formas como atributos físicos, químicos e biológicos modulam sua persistência em solos rasos e estruturalmente frágeis, ainda são pouco conhecidas. No Bioma Pampa, Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) constituem ambiente únicos para compreender esses processos. Este estudo investigou os efeitos de diferentes usos da terra (cultivos anuais, pomares de pêssego, campos e florestas nativas) sobre os teores de carbono orgânico total (COT) e as frações físicas da MOS (MOP e MOAM). Foram determinados atributos físicos (densidade do solo, macro e microporosidade), químicos (COT e carbono oxidável por permanganato – C-POx) e biológicos (atividades das enzimas β -glicosidase, arilsulfatase e atividade microbiana total por FDA), além de padrões espectroscópicos (FTIR-ATR) e isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) em 17 perfis de solo no Escudo Sul-Rio-Grandense, em Pelotas, RS. Os dados foram submetidos a testes estatísticos e à análise de componentes principais (ACP). Os diferentes usos foram avaliados pelo Índice de Manejo do Carbono (IMC) e a saúde do solo pelo Modelo dos Quatro Quadrantes (4QM), cruzando a atividade enzimática específica média e o COT. Os resultados mostraram que os RL apresentaram maiores teores médios de COT e equilíbrio entre MOP e MOAM, enquanto os RR exibiram maior variabilidade e predominância de MOP em ambientes agrícolas. O IMC foi mais elevado em lavouras e campos nativos, evidenciando o impacto do aporte de biomassa no manejo conservacionista e o potencial de recarbonização. O C-POx revelou-se mais sensível às variações de uso do solo do que o COT, com teores mais elevados em áreas de mata nativa e menores em lavouras. A combinação das atividades enzimáticas e da FDA destacou-se como indicador robusto da saúde do solo, mostrando severo declínio nos ambientes cultivados. O modelo 4QM classificou as matas nativas como solos de alta qualidade, enquanto a maioria das áreas agrícolas foi enquadrada em condições de degradação ou transição. A arquitetura porosa diferenciou as duas classes de Neossolos. Os RR apresentaram maior macroporosidade e acúmulo de polissacarídeos frescos (FTIR), com assinaturas isotópicas profundas que preservam a memória paleoambiental de transições C_3/C_4 , funcionando como arquivos paleoambientais. Em contrapartida, os RL mostraram maior microporosidade, retenção de compostos aromáticos e lipídicos estáveis, e forte sinal do uso atual na camada superficial. Os resultados evidenciam que a persistência da MOS nesses Neossolos é fortemente impactada pelo manejo e condicionada pela interação entre a atividade biológica e a porosidade. Práticas conservacionistas são urgentes para mitigar perdas de carbono, ampliar a recarbonização e fortalecer a resiliência e a sustentabilidade desses ecossistemas frágeis no Bioma Pampa.

Palavras-chave: MOP; MOAM; Atividade enzimática; Análise Isotópica; FTIR

Abstract

BURGUEÑO, Luís Eduardo Torma. **Characterization of organic carbon in Litholic and Regolithic Neosols of the Pampa Biome, Brazil**. Advisor: Jakeline Rosa de Oliveira. 2026. 282f. Thesis (Doctorate in Sciences) – Faculty of Agronomy Eliseu Maciel, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2026.

Land-use changes influence the dynamics and stability of soil organic matter (SOM). However, the mechanisms by which physical, chemical, and biological attributes modulate carbon persistence in shallow and structurally fragile soils remain poorly understood. In the Pampa Biome, Lithic (RL) and Regolithic (RR) Neosols constitute unique environments for understanding these processes. This study investigated the effects of different land uses (annual crops, peach orchards, native grasslands, and native forests) on total organic carbon (TOC) contents and physical SOM fractions, specifically particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM). Physical (bulk density, macro-, and microporosity), chemical (TOC and permanganate-oxidizable carbon – POXC), and biological attributes (β -glucosidase and arylsulfatase activities, and total microbial activity via FDA) were determined, alongside spectroscopic (FTIR-ATR) and isotopic ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) patterns across 17 soil profiles in the Sul-Riograndense Shield, in Pelotas, RS. Data were subjected to statistical tests and principal component analysis (ACP). The distinct land uses were evaluated using the Carbon Management Index (CMI), and soil health was assessed through the Four-Quadrant Model (4QM) by cross-referencing mean specific enzymatic activity and TOC. The results showed that RL exhibited higher mean TOC contents and a balance between POM and MAOM, whereas RR displayed greater variability and a predominance of POM in agricultural environments. The CMI was higher in croplands and native grasslands, highlighting the impact of biomass input under conservation management and the potential for recarbonization. POXC proved to be more sensitive to land-use variations than TOC, showing higher levels in native forest areas and the lowest values in croplands. The combination of enzymatic activities and FDA stood out as a robust indicator of soil health, displaying a severe decline in cultivated environments. Consequently, the 4QM classified native forests as high-quality soils, while most agricultural areas fell into degradation or transition categories. Porous architecture differentiated the two Neosol classes: RR presented higher macroporosity and an accumulation of fresh polysaccharides (FTIR), with deep isotopic signatures that preserve the paleoenvironmental memory of C_3/C_4 transitions, thus functioning as paleoenvironmental archives. In contrast, RL showed higher microporosity, retention of stable aromatic and lipid compounds, and a strong signal of current land use in the surface layer. These findings demonstrate that SOM persistence in these Neosols is heavily impacted by management and conditioned by the interaction between biological activity and porosity. Conservation practices are urgently needed to mitigate carbon losses, enhance recarbonization, and strengthen the resilience and sustainability of these fragile ecosystems in the Pampa Biome.

Key-words: POM; MAOM; Enzymatic activity; Isotopic analysis; FTIR

DECLARAÇÃO DE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Declaro que na elaboração deste estudo foram utilizadas as seguintes ferramentas de inteligência artificial generativa (IA): ChatGPT (OpenAI, 2026), Gemini (Google, 2026) e Microsoft Copilot (Microsoft Corporation, 2026). As IA foram utilizadas como assistentes de revisão textual, na organização e integração de referências bibliográficas, verificação de possíveis repetições ou inconsistências e comparações entre estudos acadêmicos. Estas ferramentas foram empregadas para aprimorar a fluidez da linguagem científica e a estrutura argumentativa dos resultados, aprimorando o refinamento estilístico e a adequação gramatical do manuscrito. Todo o conteúdo gerado foi revisado criticamente e validado integralmente pelo autor, que permaneceu responsável pelas análises, pela interpretação dos resultados e pela versão final do manuscrito.

Esta declaração tem por objetivo garantir transparência e integridade acadêmica, em conformidade com as recomendações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sobre o uso responsável de tecnologias de IA em pesquisas científicas.

Pelotas, julho de 2026

Luís Eduardo Torma Burgueño
Autor da Tese

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Mapa de localização da área de estudo e distribuição dos perfis de Neossolos na paisagem	54
Figura 3.2 – Diagrama de <i>boxplot</i> dos teores de carbono orgânico total (COT), carbono associado à matéria orgânica particulada (MOP) e aos minerais (MOAM) em Neossolos do ESGR	64
Figura 3.3 – Estoques de carbono no solo (Mg ha^{-1}) em horizontes superficiais de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESGR	70
Figura 3.4 – Análise de Componentes Principais das associações de MOP e MOAM com variáveis químicas e físicas em 11 perfis de Neossolos	71
Figura 4.1 – Mapa de localização dos 17 perfis de Neossolos, na região leste do Escudo Sul-Rio-Grandense, em Pelotas, RS	88
Figura 4.2 – <i>Boxplot</i> das frações granulométricas (g kg^{-1}) dos perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESGR	95
Figura 4.3 – Espectros de absorvância normalizada (0-1) de MOP e MOAM, em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diversos usos do solo	100
Figura 4.4 – Dispersão dos perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos e dos vetores de carregamentos (<i>loadings</i>) para macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e números de onda (cm^{-1}) obtidos por FTIR na fração MOP	102
Figura 4.5 – Dispersão dos perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos e dos vetores de carregamentos (<i>loadings</i>) para macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e números de onda (cm^{-1}), obtidos por FTIR na fração MOAM	108
Figura 4.6 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P1 (Neossolo Litólico), sob campo sujo	111
Figura 4.7 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P3 (Neossolo Regolítico), sob cultivo consorciado de lavoura e pomar ..	112
Figura 4.8 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR dos horizontes diagnósticos do perfil P6, em Neossolo Litólico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar	113

Figura 4.9 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P8, (Neossolo Regolítico), sob mata nativa.....	114
Figura 4.10 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P10 (Neossolo Litólico), sob cultivo de pomar	115
Figura 4.11 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P17 (Neossolo Regolítico), sob cultivo de pomar	116
Figura 4.12 – Proporção de carbono C ₃ e C ₄ nas frações MOP e MOAM, nos horizontes superficiais de Neossolos Litólicos e Regolíticos, sob diferentes usos do solo.....	123
Figura 4.13 – Dispersão bivariada de pontos da relação $\delta^{13}\text{C}$ vs. $\delta^{15}\text{N}$, na fração MOAM de perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG. Ajuste de linha de regressão para perfis RR, com coeficiente de determinação (R^2)	125
Figura 4.14 – Regressão linear entre os valores de $\delta^{15}\text{N}$ e a profundidade (cm), na fração MOAM de horizontes de perfis de Neossolos Regolíticos (RR) do ESRG .	125
Figura 5.1 – Mapa de localização da área de estudo e dispersão dos perfis de Neossolos na paisagem.....	140
Figura 5.2 – Teores de carbono orgânico total (COT) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG.....	147
Figura 5.3 – Teores de carbono oxidável por permanganato (CPOx) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG.....	148
Figura 5.4 – <i>Boxplot</i> da atividade da β -Glicosidase em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG.....	148
Figura 5.5 – <i>Boxplot</i> da atividade da arilsulfatase ($\mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG.....	149
Figura 5.6 – Teores de diacetato de fluoresceína (FDA) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG.....	150
Figura 5.7 – Teores de médios ($\pm\text{dp}$) de COT (A) e CPOx (B), em Neossolos do ESRG, sob diferentes usos do solo.....	151
Figura 5.8 – Valores médios ($\pm\text{dp}$) da atividade da β -Glicosidase (A) e da arilsulfatase (B), em Neossolos, sob diferentes usos do solo	154

Figura 5.9 – Valores médios ($\pm$ dp) da atividade enzimática média (AEM) (A) e da atividade microbiana total (FDA) (B) em Neossolos, sob diferentes usos do solo	156
Figura 5.10 – Dispersão dos perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos em relação às variáveis físicas, químicas e biológicas.....	158
Figura 5.11– Dispersão dos perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do bioma Pampa nos quatro quadrantes	159
Figura 7.1 – Imagens fotográficas dos perfis de Neossolos Regolíticos P8, P9 (mata nativa), P3 (lavoura/pomar) e P17 (pomar)	177
Figura 7.2 – Imagens fotográficas dos perfis P1 e P6, de Neossolos Litólicos, sob lavoura/pomar	179
Figura 7.3 – Imagens fotográficas do perfil P15, Neossolo Litólico sob pomar e, em destaque, a base do tronco (cepo) de antigos eucaliptos, junto ao solo, a qual conecta-se diretamente ao sistema radicular subterrâneo.....	179

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Identificação dos perfis, tipo de relevo, altimetria e profundidade dos perfis, classificação taxonômica e uso do solo, em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG	56
Tabela 3.2 – Média ($\pm$ desvio padrão) das frações texturais (g kg^{-1}), da Densidade do solo (Ds , Mg m^{-3}), macro e microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do horizonte superficial de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) sob diferentes usos do solo, na região leste do ESRG	62
Tabela 3.3 – Média ($\pm$ desvio padrão) das propriedades químicas (cmolc.kg^{-1}) do horizonte superficial de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) sob diferentes usos do solo	63
Tabela 3.4 – Teores de COT (g kg^{-1}), MOP (g kg^{-1}), MOAM (g kg^{-1}) em perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG	64
Tabela 3.5 – Índice de Manejo do Carbono (IMC), Labilidade (L), Índice de Labilidade (IL) e Índice de Estoque de Carbono (IEC) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG, sob diferentes usos	67
Tabela 3.6 – Déficit de saturação de carbono (DSC) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG, sob diferentes usos do solo	68
Tabela 4.1 – Valores da composição granulométrica (g kg^{-1}) dos perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG	95
Tabela 4.2 – Valores de densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi), em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes usos do solo	97
Tabela 4.3 – Intensidade relativa (percentual de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), obtidas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), na matéria orgânica particulada (MOP) de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes sistemas de uso do solo	101

Tabela 4.4 – Índices de aromaticidade (IAr) e de Hidrofobicidade (InH) da MOP, em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes usos do solo	104
Tabela 4.5 – Intensidade relativa (percentual de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), obtidas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), na matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes sistemas de uso do solo	106
Tabela 4.6 – Índices de Hidrofobicidade (InH) e de aromaticidade (IAr) da MOAM, em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes usos do solo	109
Tabela 4.7 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P1, em Neossolo Litólico, sob campo sujo	111
Tabela 4.8 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P1, em Neossolo Litólico, sob campo sujo	111
Tabela 4.9 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P3, em Neossolo Regolítico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar	112
Tabela 4.10 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P3, em Neossolo Regolítico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar	112
Tabela 4.11 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P6, em Neossolo Litólico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar	113
Tabela 4.12 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P6, em Neossolo Litólico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar	113
Tabela 4.13 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P8, em Neossolo Regolítico, sob mata nativa	114

Tabela 4.14 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P8, em Neossolo Regolítico, sob mata nativa	114
Tabela 4.15 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P10, em Neossolo Litólico, sob cultivo de pomar	115
Tabela 4.16 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P10, em Neossolo Litólico, sob cultivo de pomar	115
Tabela 4.17 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P17, em Neossolo Regolítico, sob cultivo de pomar	116
Tabela 4.18 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P17, em Neossolo Regolítico, sob cultivo de pomar	116
Tabela 4.19 – Resultados da análise isotópica do $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG	120
Tabela 4.20 – Teores (%) relativos de vegetação C_3 e C_4 nas frações físicas da matéria orgânica de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR).....	124
Tabela 5.1 – Teores de carbono orgânico no solo COT (g kg^{-1}) e de carbono orgânico oxidado por permanganato CPOx (mg kg^{-1}), em 17 perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR).....	151
Tabela 5.2 – Valores da atividade microbiana total – FDA ($\mu\text{g mL}^{-1}$), β -glicosidase ($\mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$); arilsulfatase ($\mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) e atividade enzimática específica média – AEM ($\mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), nos diversos usos do solo, em Neossolos Litólicos (RR) e Regolíticos (RR) do ESRG.....	153
Tabela 5.3 – Atributos químicos da camada superficial (0-10 cm) dos perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes usos do solo	157
Tabela 5.4 – Resultados do método de quatro quadrantes (4QM) para os Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR)	160

Sumário

1. Introdução	23
1.1. Hipótese.....	27
1.2. Objetivos	27
2. Revisão de literatura	28
2.1. Dinâmica da matéria orgânica do solo	29
2.2. Diversidade de espécies vegetais e atividade microbiológica.....	31
2.3. Frações da matéria orgânica do solo	34
2.4. Limites de saturação do carbono no solo.....	36
2.5. Importância da estabilidade do solo para a biodiversidade e fertilidade do solo	38
2.6. Impactos do uso agrícola na matéria orgânica do solo	39
2.7. A formação de Neossolos no Escudo Sul-Rio-Grandense.....	41
2.8. Neossolos: importância e limitações	44
2.9. Restrições ao uso agrícola de Neossolos	46
2.10. Formação da vegetação nativa do bioma Pampa	48
2.11. Cultivos agrícolas em Neossolos Litólicos e Regolíticos do ESRG	49
3. Capítulo 1 – Estabilidade do carbono do solo em Neossolos do Bioma Pampa, Brasil	51
3.1. Introdução	51
3.2. Material e métodos.....	54
3.2.1. Caracterização da área de estudo	55
3.2.2. Levantamento e classificação dos solos.....	55
3.2.3. Análises laboratoriais.....	57
3.2.4. Índice de Manejo do Carbono	57

3.2.5.	Déficit de carbono no solo.....	58
3.2.6.	Estoques de carbono orgânico do solo.....	59
3.2.7.	Análise estatística.....	60
3.3.	Resultados	62
3.3.1.	Teores de carbono orgânico no solo.....	63
3.3.2.	Índice de Manejo do Carbono	66
3.3.3.	Déficit de saturação de carbono no solo.....	68
3.3.4.	Estoques de carbono no solo.....	69
3.3.5.	Análise de Componentes Principais	70
3.4.	Discussão	72
3.4.1.	Índice de Manejo do Carbono	74
3.4.2.	Déficit de saturação de carbono no solo.....	76
3.4.3.	Estoques de carbono no solo.....	77
3.4.4.	Análise de Componente Principais.....	79
3.5.	Conclusões	81
4.	Capítulo 2 – A porosidade como controle primário da persistência da matéria orgânica em Neossolos Litólicos e Regolíticos: evidências isotópicas e espectroscópicas	83
4.1.	Introdução	83
4.2.	Material e métodos.....	87
4.2.1.	Amostragem do solo.....	88
4.2.2.	Análises físicas.....	89
4.2.3.1.	Índices estruturais da matéria orgânica do solo	90
4.2.4.	Análises isotópicas do carbono e do nitrogênio	91
4.2.5.	Análise estatística.....	93
4.3.	Resultados	94

4.3.1.	Análise de propriedades físicas dos Neossolos	94
4.3.2.	Análise dos padrões espectrográficos da matéria orgânica do solo	97
4.3.3.	Análise das regiões espectrais da MOP	98
4.3.4.	Análise de Componentes Principais na MOP	102
4.3.5.	Indicadores espectroscópicos da qualidade química da MOP	103
4.3.6.	Análise das regiões espectrais na MOAM	105
4.3.7.	Análise de Componentes Principais na MOAM	107
4.3.8.	Indicadores espectroscópicos da qualidade química da MOAM.....	108
4.3.9.	Caracterização da matéria orgânica ao longo dos perfis de Neossolos .	110
4.3.9.1.	Caracterização da MOP	117
4.3.9.2.	Caracterização da MOAM	118
4.3.10.	Caracterização isotópica de Neossolos Litólicos e Regolíticos do ESRG	119
4.3.11.	Caracterização isotópica nos diferentes usos do solo	121
4.4.	Discussão	125
4.4.1.	Assinatura espectroscópica e sensibilidade das frações físicas	129
4.4.2.	Arquivos isotópicos e evolução paleoambiental no Bioma Pampa	130
4.5.	Conclusões	134
5.	Capítulo 3 – Carbono Oxidável por Permanganato (CPOx) e atividade enzimática como indicadores de saúde do solo em Neossolos do Bioma Pampa, Brasil	136
5.1.	Introdução	136
5.2.	Material e métodos.....	139
5.2.1.	Coleta e caracterização das amostras de solo	140
5.2.2.	Análises químicas do solo.....	141
5.2.3.	Determinação do carbono orgânico total	141
5.2.4.	Carbono oxidável por permanganato de potássio – CPOx.....	142

5.2.5.	Atividade microbiana total	142
5.2.6.	Análise enzimática.....	143
5.2.7.	Análise da qualidade dos solos.....	144
5.2.8.	Análise estatística.....	144
5.3.	Resultados	146
5.3.1.	Comparações entre Neossolos Litólicos e Regolíticos.....	146
5.3.2.	Comparações entre os diferentes dos usos do solo.....	150
5.3.3.	Caracterização química dos solos.....	156
5.3.4.	Análise de Componentes Principais	158
5.3.5.	Avaliação da saúde do solo utilizando o 4QM	159
5.4.	Discussão	161
5.4.1.	Teores de carbono orgânico total e carbono oxidável por permanganato	161
5.4.2.	Atividade microbiológica nos diferentes agroecossistemas.....	162
5.4.3.	Influência da acidez do solo na atividade microbiológica e enzimática ..	166
5.4.4.	Associações multivariadas entre indicadores	168
5.4.5.	Avaliação da saúde do solo em Neossolos utilizando o Método dos Quatro Quadrantes	170
5.5.	Conclusões	172
6.	Considerações finais	174
7.	Perspectivas futuras	176
	Referências	180
	Apêndices	206
	Apêndice A – Histórico de uso e manejo das áreas.....	207
	Quadro 1 – Datas das coletas de amostras, localização e histórico de usos da terra, em Neossolos Litólicos e Regolíticos, em diversas propriedades localizadas no interior de Pelotas, na região do Escudo Sul-Rio-Grandense	212

Apêndice B – Análise estatística do Capítulo 1.....	214
Apêndice C – Análise estatística do Capítulo 2	218
Apêndice D – Análise estatística do Capítulo 3	224
Tabela 1 – Índices da correlação linear de Pearson e nível de significância (p-valor), de variáveis químicas, físicas e biológicas, de amostras coletadas em 2025, na camada superficial do solo (0-10 cm).....	244
Anexos	245
Anexo A – Descrição morfológica dos perfis.....	246

1. Introdução

A interferência humana nos sistemas naturais e planetários atingiu tamanha magnitude e amplitude, suscitando inúmeras discussões sobre o estabelecimento de uma nova era geológica condicionada pela ação humana. Essa mudança na contagem do tempo foi definida por Crutzen e Stoermer (2000) como Antropoceno: uma nova forma de nomear os efeitos da ação humana no planeta Terra. Isto significa que os seres humanos, desde o início da Revolução Industrial, alteraram os processos geológicos em escala planetária o suficiente para provocar uma transição para um novo período geológico. O Antropoceno, para Zalasiewicz *et al.* (2008), é uma metáfora vívida, porém informal, da mudança ambiental global. Neste período recente, as atividades humanas têm efeitos em escala planetária e agem como forçantes adicionais nos sistemas da Terra. Assim, a força ambiental exercida pela humanidade tornou-se um componente adicional significativo, capaz de alterar os limites planetários e os processos que são críticos para manter a estabilidade e a resiliência do sistema terrestre como um todo (Richardson *et al.*, 2023). As consequências catastróficas das transformações ambientais antropogênicas, manifestadas nas mudanças climáticas em curso, evidenciam que a lógica capitalista se tornou letal ao promover danos irreparáveis ao equilíbrio homeostático existente no sistema planetário.

Entre os elementos mais afetados por essa nova era, os solos ocupam posição central. Eles se tornaram parte importante da agenda global para a redução dos impactos das mudanças climáticas, não apenas por sua função agrícola, mas também por sua capacidade de atuar como grandes reservatórios de carbono. Estima-se que o metro superior do solo armazene aproximadamente três vezes o estoque de carbono

presente na vegetação e o dobro do que se encontra na atmosfera (Smith, 2012). Essa característica confere aos solos papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas, uma vez que práticas de manejo conservacionista podem aumentar os estoques de carbono orgânico do solo (COS), reduzir emissões de CO₂ e, simultaneamente, melhorar a fertilidade e a resiliência dos sistemas agrícolas (Lal; Negassa; Lorenz, 2019).

A relevância dos solos para a agenda climática é reforçada por iniciativas internacionais como os programas *4p1000*¹ e o *GSOCseq*² da FAO, que buscam ampliar o sequestro de carbono orgânico do solo e garantir a segurança alimentar mundial (Smith *et al.*, 2019). As medidas de mitigação baseadas na natureza representam algumas das opções mais importantes atualmente disponíveis (Nabuurs *et al.*, 2022). Essas iniciativas partem do reconhecimento de que enfrentar o triplo desafio de alcançar a segurança alimentar, mitigar as mudanças climáticas e reduzir a perda de biodiversidade é essencial para a saúde planetária (Te-Wierik *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a agricultura familiar assume um papel estratégico. Globalmente, ela ocupa cerca de 70–80% das terras agrícolas e produz aproximadamente 80% dos alimentos em termos de valor (Lowdera; Sánchez; Bertini, 2021). Nos países em desenvolvimento, responde por cerca de 80% da produção alimentar (Graeub *et al.*, 2016). No Brasil, a agricultura familiar congrega 77% dos estabelecimentos agrícolas, empregando 67% da força de trabalho rural, embora ocupe apenas 23% da área cultivável do país (IBGE, 2019). Essa condição evidencia sua importância para a segurança alimentar e manutenção da vida no campo, mas também sua vulnerabilidade frente aos extremos climáticos e às pressões socioeconômicas.

No bioma Pampa, situado no sul do Brasil, a fragilidade dos solos é um fator adicional de preocupação. O embasamento cristalino do Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG) produziu solos pouco desenvolvidos, como Neossolos Litólicos (RL) e

¹ O *4p1000* é uma iniciativa internacional lançada na COP21 em 2015 que visa aumentar o carbono orgânico no solo em 0,4% ao ano. O objetivo principal é combater as mudanças climáticas e garantir a segurança alimentar global por meio de práticas agrícolas sustentáveis (United Nations, 2026).

² O *GSOCseq* é o Mapa Global do Potencial de Sequestro de Carbono Orgânico no Solo, uma ferramenta digital criada para estimar a capacidade de armazenamento de carbono na camada arável (0–30 cm) de áreas agrícolas (FAO, 2022).

Regolíticos (RR), caracterizados por severas limitações de uso agrícola (Dalmolin; Pedron; Flores, 2019). A evolução da paisagem do bioma Pampa, ao longo do Holoceno, permitiu o avanço de formações florestais em áreas antes dominadas por campos (Behling, 2002; Cordeiro; Hasenack, 2009; Pillar, 2003), criando mosaicos de vegetação que refletem a complexidade ecológica da região. Neste cenário, a ocupação agrícola da região leste do ESRG, especialmente em pequenas propriedades familiares, tem imposto pressões significativas sobre esses solos frágeis.

Os Neossolos são altamente vulneráveis à degradação e à redução da biodiversidade na conversão de áreas nativas (Dalmolin; Pedron; Flores, 2019). A conversão de áreas de florestas do ESRG, em pastagens ou cultivos agrícolas nestes solos, resulta em perdas expressivas de carbono do solo. Em termos percentuais, Vilella *et al.* (2026) destacam que o Pampa apresentou reduções significativas de COS, em torno de 17,4%, após a conversão para agricultura, semelhantes às do bioma Mata Atlântica. Aduzem também, que o Pampa se destacou por possuir sistemas agrícolas mais antigos (em média 31 anos de conversão), contribuindo para déficits mais pronunciados, isto porque, perdas de COS tendem a se acumular ao longo do tempo. Por outro lado, em áreas agrícolas, práticas sustentáveis como agroflorestas, consórcios e rotações diversificadas têm demonstrado potencial para mitigar esses impactos, ampliando a resiliência ecológica e a estabilidade dos estoques de carbono (Cezar *et al.*, 2015; Leite *et al.*, 2021). Além disso, Machado *et al.* (2024) não verificaram diferenças significativas nos estoques de carbono do solo na conversão de campos nativos do bioma Pampa para cultivos agrícolas.

A renovação e persistência da matéria orgânica do solo (MOS) são os principais processos que condicionam a fertilidade e a estabilidade estrutural dos solos em ecossistemas agrícolas. O paradigma contemporâneo enfatiza que a persistência da MOS depende, principalmente, da interação entre processos microbianos, associações organo-minerais e proteção física em agregados (Cotrufo *et al.*, 2013; Kleber; Sollins; Sutton, 2007). Entretanto, em solos frágeis e pouco desenvolvidos, a recalitrância química intrínseca dos compostos, pode desempenhar um papel importante. Nesse sentido, a diversidade de espécies vegetais e a atividade microbiológica desempenham

papel central, uma vez que raízes vivas e seus exsudatos constituem a principal via de formação da MOS persistente, promovendo maior atividade microbiana e favorecendo a estabilização de compostos orgânicos (Jackson *et al.*, 2017; Sokol *et al.*, 2019). Por outro lado, a heterogeneidade estrutural do solo condiciona a atividade microbiana e os processos químicos associados à ciclagem da MOS. Solos naturais, autorregulados e resilientes, apresentam maior estabilidade estrutural e diversidade microbiana, enquanto solos manejados intensivamente tendem a perder agregados e reduzir sua funcionalidade ecológica (Hartmann; Six, 2023; Or; Keller; Schlesinger, 2021). Essa distinção reforça a necessidade de práticas conservacionistas que integrem atributos físicos, químicos e biológicos para sustentar a saúde dos agroecossistemas.

No caso específico dos RL e RR do ESRG, há escassez de informações detalhadas sobre a estabilidade e persistência da MOS. Esses solos, frequentemente ocupados por pequenas propriedades familiares dedicadas à fruticultura, à agricultura e pecuária de pequena escala. Em Pelotas e região, cultivos como o pêssego e o milho, são fundamentais para a economia local e para a segurança alimentar regional. Entretanto, sua fragilidade exige manejo cuidadoso e estratégias adaptativas frente às mudanças climáticas.

Neste cenário, compreender como atributos físicos, químicos e biológicos são afetados pelos usos do solo e como contribuem na estabilização da MOS é essencial para orientar e garantir a sustentabilidade da agricultura familiar na região. Para tanto, é necessário investigar de que forma RL e RR direcionam suas rotas de estabilização ou degradação do carbono sob o estresse dos usos atuais. Por essas razões este trabalho propõe-se a caracterizar a MOS, sob diferentes usos em Neossolos Litólicos e Regolíticos da região leste do ESRG, Pelotas, RS. Com isso, busca-se mitigar a lacuna de dados regionais, gerando subsídios científicos para a formulação de estratégias de conservação e manejo que promovam a recarbonização e a resiliência ecológica de solos frágeis do bioma Pampa.

1.1 Hipótese

Os Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), da região leste do Escudo Sul-Rio-Grandense, apresentam trajetórias pedogenéticas distintas associadas à dinâmica paleoambiental de alternância entre campos e florestas no bioma Pampa. Essas trajetórias condicionaram porosidades próprias, intrínsecas a cada tipo de formação vegetal, que direcionam rotas distintas de estabilização da matéria orgânica do solo (MOS), sob os sistemas atuais de uso.

1.2 Objetivos

1) Geral:

Avaliar a quantidade, a distribuição do carbono orgânico e os indicadores de qualidade em Neossolos Litólicos e Regolíticos, sob diferentes condições atuais de uso, na região leste do Escudo Sul-Rio-Grandense, Bioma Pampa.

2) Específicos:

1. Testar se a distribuição dos teores de carbono e frações físicas da MOS, nos horizontes superficiais dos perfis estudados diferem entre Neossolos Litólicos e Regolíticos;
2. Testar se Neossolos Litólicos e Regolíticos diferem em relação aos teores das frações granulométricas (areia, silte e argila);
3. Testar se os diferentes usos do solo afetam os teores de carbono orgânico do solo e a atividade enzimática e microbiana de Neossolos Litólicos e Regolíticos;
4. Comparar se os teores de COT, CPOx e as atividades enzimáticas da arilsulfatase diferem entre condições atuais de mata, campo, pomar e lavoura na camada de 0–10 cm, avaliando suas relações com os atributos físicos e químicos do solo.
5. Investigar se a macro e microporosidade e as assinaturas espectroscópicas da MOP e da MOAM se relacionam com os indicadores de carbono e atividade biológica, caracterizando a variação isotópica e espectroscópica das frações orgânicas, em perfis selecionados de Neossolos Litólicos e Regolíticos.

2. Revisão de literatura

Conforme avançamos para cenários climáticos com temperaturas mais elevadas e eventos extremos aumentam em intensidade e frequência (Richardson *et al.*, 2023; Van Gils, 2020), áreas agrícolas serão cada vez mais fortemente afetadas, com perdas significativas de solo agriculturável. Em regiões intensamente impactadas pelas mudanças climáticas, a conservação do solo exigirá práticas de manejo capazes de preservar funções ecológicas e recuperar serviços ecossistêmicos essenciais à sustentabilidade agrícola e ambiental. O conhecimento das características dos solos e suas relações com o ambiente permitirá melhores tomadas de decisão sobre as medidas de conservação, mitigação e controle a serem implementadas.

Neste contexto, os solos tornaram-se recentemente parte da agenda global do carbono para a mitigação e adaptação às alterações climáticas. Isto porque o metro superior do solo pode potencialmente armazenar três vezes mais carbono do que o encontrado na atmosfera e quase o dobro do que nas plantas (Bacar *et al.*, 2022). Entretanto, os solos estão entre os recursos mais vulneráveis do planeta devido a conversão de áreas nativas, degradação e redução da biodiversidade. Os estoques de carbono orgânico do solo (COS) de muitas áreas agrícolas estão atualmente em declínio devido a mudanças no uso e manejo da terra. Estimativas realizadas por Sanderman, Hengl e Fiske (2017) indicam que, cerca de 8% dos estoques globais de carbono orgânico foram reduzidos nos últimos 12.000 anos. A redução nos estoques de C pode ser atribuída principalmente às atividades agrícolas, bem como às mudanças climáticas (Poeplau; Dechow, 2023). Por estas razões, a captura e o sequestro de C nos solos têm ganhado atenção como uma estratégia para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, especialmente o CO₂.

Solos bem manejados têm mostrado potencial para contribuir tanto para a mitigação quanto para a adaptação às mudanças climáticas. Práticas de manejo conservacionista melhoram a estrutura do solo, a retenção de água, o fornecimento de nutrientes e dão suporte à biodiversidade microbiana (Lal; Negassa; Lorenz, 2019); e são cruciais para sustentar os serviços ecossistêmicos e a produtividade agrícola (Amelung *et al.*, 2020). O aumento da matéria orgânica do solo (MOS) pode mitigar parcialmente as emissões de carbono e é, ao mesmo tempo, indispensável para a adaptação dos sistemas agrícolas às mudanças no clima devido aos numerosos co-benefícios que oferece.

2.1. Dinâmica da matéria orgânica do solo

A compreensão dos mecanismos que regem a estabilidade e a persistência do carbono no solo passou por uma profunda mudança de paradigma desde o final do século XX. O modelo clássico da “humificação” (Camargo; Santos; Guerra, 1999; Novotny; Martin-Neto, 1999) postulava que a formação da MOS ocorria pela síntese biótica ou abiótica de macromoléculas complexas denominadas substâncias húmicas. Nesse contexto, sua permanência no solo era explicada pela estabilidade química intrínseca, atribuída à recalcitrância dessas macromoléculas.

O paradigma contemporâneo da dinâmica do carbono no solo enfatiza que a persistência da MOS resulta da ação integrada da associação com minerais reativos (Kleber; Sollins; Sutton, 2007; Lehmann; Kleber, 2015; Six *et al.*, 2002), proteção física em agregados e poros (Bhattacharyya *et al.*, 2021; Hartmann; Six, 2023) e acessibilidade microbiana aos substratos orgânicos (Erktan; Or; Scheu, 2020). A dinâmica e estabilização da MOS foi descrita por Kleber, Sollins e Sutton (2007) por meio de um modelo conceitual de interações organo-minerais. Nessa concepção, a estabilização resulta da formação de camadas estruturadas de compostos orgânicos sobre superfícies minerais. Na zona mais interna, próxima ao mineral, predominam interações químicas fortes que garantem proteção e longevidade às moléculas ali

adsorvidas. Sobre essa camada, outras substâncias orgânicas podem se organizar em estruturas supramoleculares menos estáveis, mas ainda fisicamente protegidas contra a ação de enzimas e microrganismos. Dessa forma, os compostos incorporados às camadas internas tornam-se parte da fração persistente da MOS, cuja estabilidade depende da intensidade das interações organominerais e da estrutura física resultante.

A compreensão clássica sustentava que a formação e estabilidade da MOS dependiam da recalcitrância química intrínseca dos compostos, especialmente de estruturas aromáticas complexas. Essa visão foi contestada por Kleber *et al.* (2011), que demonstraram que o carbono de longa permanência é composto majoritariamente por materiais lábeis derivados da atividade microbiana, e não por moléculas intrinsecamente resistentes. Essa visão enfatiza que a persistência do carbono no solo é determinada pela natureza das interações organo-minerais e pela auto-organização molecular. Complementando essa mudança de paradigma, Cotrufo *et al.* (2013) introduziram o conceito de *Microbial Efficiency–Matrix Stabilization* (MEMS), segundo o qual constituintes lábeis da serapilheira vegetal (como açúcares, proteínas e compostos solúveis) são metabolizados de forma eficiente pelos microrganismos, gerando produtos microbianos que, ao se ligarem à matriz mineral, tornam-se os principais precursores da MOS estabilizada. O estudo de Cotrufo *et al.* (2015) demonstrou que aproximadamente 19% do carbono inicial da serapilheira foi incorporado ao solo após três anos de decomposição. Destes, a maior parte foi recuperada em frações consideradas estáveis, com 94–97% do C incorporado permanecendo protegido contra rápida mineralização. A análise das frações revelou que, nas fases iniciais da decomposição, predominou a via bioquímica, com maior incorporação de C em partículas finas (silte e argila), enquanto nas fases finais destacou-se a via física, com acúmulo de C em frações leves e areia. Portanto, a persistência da MOS não depende diretamente da complexidade molecular dos resíduos, mas emerge da interação entre a ecologia microbiana e os processos de estabilização física e química em minerais. Nessa perspectiva, a atividade e a eficiência da microbiota atuam como motores da formação de MOS persistente, convertendo compostos lábeis em necromassa microbiana que se liga fortemente à matriz mineral (Cotrufo *et al.*, 2013; Kallenbach *et al.*, 2016; Sokol *et al.*, 2022). Assim, a MOS é

concebida como um *continuum* de compostos orgânicos em constante transformação, cuja estabilidade depende mais da biodiversidade do solo e das interações ecológicas e físico-químicas do que de qualquer resistência molecular intrínseca dos compostos orgânicos.

2.2. Diversidade de espécies vegetais e atividade microbiológica

A biodiversidade do solo está organizada em um sistema hierárquico, organizado em diferentes níveis de complexidade, desde interações microbianas locais até funções ecossistêmicas. Neste contexto, os solos são concebidos como compostos por numerosas “esferas” (detritosfera, drilosfera, porosfera, agregatosfera e rizosfera), ambientes de influência biologicamente relevantes que definem grande parte de sua heterogeneidade espacial e temporal (Beare *et al.*, 1995). Embora não mutuamente exclusivas, cada “esfera” possui propriedades bastante distintas que regulam as interações entre os organismos e os processos biogeoquímicos que eles mediam. Nesse sistema, a diversidade radicular atua como elemento estruturante, integrando processos físicos, químicos e biológicos em múltiplas escalas. Na base da hierarquia estão as interações microbianas em microambientes específicos, onde a diversidade funcional e estrutural dos sistemas radiculares exerce papel direto ao fornecer exsudatos e criar gradientes de recursos. Em um nível intermediário, essas interações locais se conectam à formação de agregados e à ciclagem de nutrientes, processos que dependem da atividade conjunta de raízes e microrganismos do solo. No topo da hierarquia, encontram-se as funções ecossistêmicas mais amplas, como a manutenção da fertilidade, a estabilidade estrutural e a resiliência do solo frente a distúrbios, que resultam da interação e integração dos níveis inferiores.

As raízes têm um papel central e determinante na estruturação do solo, pois servem como um elo interligando microambientes específicos e regulando a dinâmica do ecossistema. A rizosfera destaca-se como um ambiente de intensa atividade biológica, diretamente influenciado pelas exsudações radiculares, que fornecem

substratos orgânicos de fácil assimilação. A disponibilidade de C facilmente acessível e compostos solúveis cria um microambiente altamente dinâmico, onde se estabelecem interações tróficas complexas e processos acelerados de ciclagem de nutrientes.

As características arquitetônicas, morfológicas e fisiológicas das raízes são determinantes para os processos ecossistêmicos essenciais em sistemas produtivos. Os diferentes traços radiculares como profundidade, densidade, longevidade e capacidade de exsudação, influencia diretamente a composição e atividade das comunidades microbianas, modulando a biologia do solo e interagindo com atributos químicos e físicos (Bardgett; Mommer; De Vries, 2014). A heterogeneidade de raízes e a biodiversidade do solo constituem o eixo central da engenharia ecológica do solo voltada à sustentabilidade agrícola (Bender *et al.*, 2016). Diferentes arquiteturas radiculares criam uma variedade de microambientes que sustentam comunidades microbianas diversas e funcionais. Neste contexto, Lange *et al.* (2015) demonstraram que a diversidade de plantas, expressa sobretudo na variedade de sistemas radiculares, está diretamente associada ao aumento da atividade microbiana e ao acúmulo de carbono no solo. Em suma, os diferentes traços radiculares ampliam a complexidade das interações entre plantas e microbiota, resultando em maior multifuncionalidade do solo.

Entretanto, a atividade microbiana no solo não é homogênea, ela concentra-se em *hotspots* (locais específicos de alta atividade, como rizosfera, detritos, bioporos e superfícies de agregados) e em *hot moments* (períodos curtos de intensa atividade, como após exsudação radicular ou deposição de resíduos). Esses locais concentram fluxos de carbono e nutrientes, promovendo mineralização acelerada e transformações da matéria orgânica. Os *hotspots* correspondem a menos de 5% do volume do solo e concentram a maior parte da atividade microbiana e dos fluxos biogeoquímicos (Kuzyakov; Blagodatskaya, 2015). A diversidade de raízes é decisiva nesse processo, pois determina a quantidade e qualidade de exsudatos, a formação de bioporos e a heterogeneidade espacial que sustenta tais *hotspots*, modulando diretamente a distribuição e intensidade da atividade microbiana.

Na formação da MOS os resíduos radiculares possuem cerca de cinco vezes mais chance de serem estabilizados do que os resíduos da parte aérea. Em termos quantitativos, aproximadamente 45% do carbono aportado pelas raízes é incorporado e estabilizado em frações do solo, enquanto apenas 8% do carbono proveniente da parte aérea segue o mesmo destino (Jackson *et al.*, 2017). Essa discrepância é explicada pela maior proximidade das raízes com a matriz mineral e com a microbiota do solo, além de sua composição química, que favorece interações organo-minerais e a formação de associações estáveis. Em contraste, os resíduos da parte aérea, depositados na superfície, estão mais expostos à decomposição rápida e à respiração microbiana, resultando em menor eficiência de estabilização.

A entrada de carbono por raízes vivas via rizodepósitos é mais eficiente do que a entrada de restos de parte aérea e raízes, formando reservatórios de MOS persistente, ligado a minerais (Gregory, 2022). Sokol *et al.* (2019) verificaram que o aporte de raízes vivas constitui a principal via de formação da MOS, podendo ser de duas a 13 vezes mais eficientemente incorporadas, superando em importância os resíduos de raízes mortas ou da parte aérea. Os exsudatos radiculares e fluxos contínuos de carbono oriundos das raízes em atividade condicionam tanto a biologia quanto a química do solo, promovendo maior atividade microbiana e favorecendo a estabilização de compostos orgânicos.

Em grande parte da estrutura do solo, os microrganismos são minimamente ativos e distribuídos de forma esparsa; menos de 0,000001% da área total da superfície do solo mineral pode ser ocupada por microrganismos vivos. No entanto, em habitats localizados, dinâmicos e ricos em recursos, como a rizosfera, a hifosfera e a detritosfera, o carbono e outros nutrientes são mais abundantes do que no solo a granel. Esses habitats ricos em recursos podem constituir uma porção significativa do solo superficial: entre 8% e 26% do volume total do solo nos primeiros 10 cm pode ser ocupado somente pela rizosfera. Dentro de habitats onde raízes e hifas fúngicas estão crescendo ou se decompondo ativamente, a biomassa e a atividade microbiana são de 0,5 a 20 vezes maiores do que no solo a granel circundante, as interações bióticas são mais frequentes e as transformações da matéria orgânica conduzidas por

microrganismos são rápidas (Sokol *et al.*, 2022). Essa dinâmica evidencia que a diversidade de raízes vivas cria microambientes ricos em carbono assimilável, estimulando interações tróficas que repercutem na ciclagem de nutrientes e na estabilidade estrutural do solo, fundamentais para a resiliência ecológica. O solo não rizosférico é, portanto, um deserto nutricional onde a maioria dos organismos se encontra morta ou em dormência devido a ausência dos ingredientes necessários para seu metabolismo, principalmente, substratos orgânicos e ambiente físico-químico favorável (Moreira; Siqueira, 2006).

2.3. Frações da matéria orgânica do solo

Uma estrutura conceitual e prática para compreender e prever a dinâmica da MOS é dividi-la em matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM). Nesse contexto, a MOP representa o estágio inicial da entrada de carbono no solo, enquanto o MOAM corresponde ao resultado da transformação e estabilização mediada por microrganismos e minerais. Na proposta de Lavalley, Soong e Cotrufo (2019), a MOP é a fração composta por fragmentos de resíduos vegetais e animais estruturalmente reconhecíveis, pouco transformados pela atividade microbiana, caracterizando-se por partículas de maior tamanho, baixa densidade e composição heterogênea. Trata-se de um compartimento lábil, com tempo médio de residência curto (1–10 anos), que atua como fonte imediata de energia e nutrientes para microrganismos e responde de forma rápida às mudanças ambientais e de manejo. Em contraste, a fração MOAM é formada por moléculas de baixo peso molecular derivadas da decomposição microbiana de compostos lábeis, fortemente adsorvidas ou complexadas às superfícies minerais. Essa fração apresenta alta densidade, composição dominada por produtos microbianos e persistência prolongada (décadas a séculos), constituindo o compartimento mais estável da MOS e responsável pelo sequestro de carbono em longo prazo.

Essas diferenças conceituais reforçam a necessidade de caracterizar e quantificar separadamente essas frações, dado que sua dinâmica distinta influencia diretamente o funcionamento do solo e a provisão de serviços ecossistêmicos. Os resultados de Yu *et al.* (2022) mostram que MOP e MOAM não são compartimentos rigidamente desacoplados, como sugerido pelo MEMS em sua versão mais clássica. Em vez disso, há evidências, indicando que tanto resíduos vegetais quanto microbianos contribuem para a MOAM em diferentes graus, dependendo do tipo de solo e das condições ambientais. O estudo desafia a hipótese de que a MOAM seja exclusivamente microbiana, mostrando que insumos vegetais também desempenham papel relevante, especialmente em ambientes úmidos. Essa visão amplia o entendimento sobre a formação e persistência da MOS e reforça a necessidade de considerar ambas as frações em modelos de sequestro de carbono.

Em solos temperados, análises realizadas por Angst *et al.* (2021) indicaram que 60–80% do carbono estabilizado em MOAM derivava de produtos microbianos (aminoácidos, polissacarídeos e lipídios simples), enquanto compostos vegetais estruturais (como lignina e cutina) representaram apenas 10–20% da fração estabilizada, mas podem persistir quando protegidos por oclusão física. A eficiência de incorporação de carbono microbiano à MOAM foi estimada em até 40% do carbono assimilado, reforçando o papel central da atividade microbiana na persistência da MOS. A contribuição relativa de cada fonte varia conforme o tipo de solo, clima e manejo, mas a evidência converge para a predominância da necromassa microbiana como base da estabilização de longo prazo. Em experimentos de incubação com substratos lábeis (glicose, aminoácidos e celulose), Kallenbach, Frey e Grandy (2017) observaram que até 50% do carbono adicionado foi transformado em biomassa microbiana em poucos dias. Mesmo tendo origem em compostos altamente lábeis, após 6 meses, cerca de 18–25% do carbono inicial permaneceu no solo como MOS estável e que mais de 80% do carbono estabilizado em frações minerais tinha origem microbiana, e não diretamente vegetal.

A formação da MOAM ocorre por diferentes vias, dependendo da densidade microbiana no solo. Em áreas de alta densidade microbiana, como a rizosfera,

predomina a via de renovação microbiana *in vivo*, na qual substratos lábeis são assimilados com alta eficiência de uso de carbono e posteriormente incorporados à MOAM. Já em áreas de baixa densidade microbiana, a formação da MOAM tende a ocorrer por sorção direta de compostos vegetais intactos ou parcialmente oxidados em superfícies minerais pouco colonizadas, favorecendo substratos de C com forte afinidade de sorção. Os controles bióticos e abióticos da dinâmica da MOS não são excludentes, mas espacialmente determinados, variando conforme o microambiente do solo (Sokol; Kittredge; Bradford, 2018). O estudo desenvolvido por Kumar *et al.* (2017) evidenciou que os exsudatos radiculares não apenas fornecem carbono lábil para os microrganismos, mas também desencadeiam uma resposta enzimática voltada à mobilização de nutrientes, reforçando o papel das raízes como agentes estruturadores e bioquímicos do solo.

O manejo direcionado à MOAM é insuficiente porque as vias de formação da matéria orgânica persistente do solo são diversas e variam com as condições ambientais. O manejo eficaz também deve considerar a matéria orgânica particulada (MOP). Em muitos solos, existe potencial para ampliar os estoques de MOP, que pode persistir por longos períodos e pode ser um precursor direto da MOAM. (Angst *et al.*, 2023). Neste contexto, as estratégias de manejo devem ser adaptadas ao grau de saturação de C, à mineralogia e ao tipo de ecossistema, reconhecendo que tanto MOP quanto MOAM são cruciais para maximizar o potencial dos solos como sumidouros de carbono.

2.4. Limites de saturação do carbono no solo

A saturação de C no solo é definida como o limite máximo de acúmulo de carbono orgânico que pode ser estabilizado em associação com minerais e agregados, condicionado pela capacidade físico-química do solo (Stewart *et al.*, 2007; Six *et al.*, 2002). Ao se aproximar desse limite, a eficiência de sequestro de carbono diminui, tornando os incrementos adicionais cada vez menores.

O potencial conceito de saturação de carbono foi utilizado por Chen *et al.* (2019) para estimar potencial de sequestro de carbono orgânico na camada superficial dos solos da França. Os resultados encontrados evidenciam que os solos agrícolas concentram o maior déficit de saturação de carbono, com valores modais próximos de 40 Mg C ha⁻¹, respondendo por cerca de 66% do potencial nacional de sequestro. Em contraste, as pastagens apresentaram déficits intermediários, em torno de 20 Mg C ha⁻¹, mas com elevada variabilidade, enquanto os solos florestais se mostraram próximos da saturação, com valores próximos de zero e participação de apenas 17% no potencial nacional. Essa distribuição revela que os sistemas agrícolas, por estarem mais distantes da saturação, oferecem maior oportunidade de recarbonização, ao passo que os solos florestais já atingiram seu limite de estabilização. Stewart *et al.* (2007) indicam que solos degradados ou distantes da saturação respondem melhor ao manejo, acumulando carbono de forma mais eficiente. Em contrapartida, solos próximos ao limite apresentam redução da eficiência de sequestro, mesmo diante de maiores entradas de carbono.

Os resultados de Haddix *et al.* (2020) evidenciam que a textura do solo é um fator crítico para a estabilização do carbono. Solos argilosos, com maior superfície específica, favoreceram a incorporação de carbono em MOAM, garantindo maior persistência em longo prazo. Em contraste, solos arenosos mostraram menor capacidade de retenção mineral, concentrando o carbono em MOP, fração mais lábil e vulnerável à decomposição. Essa relação foi estatisticamente robusta ($R^2 = 0,877$; $p < 0,001$), confirmando que a textura fina potencializa o sequestro estável de carbono, enquanto a textura grossa limita a eficiência da estabilização. Além disso, a composição textural solo condiciona sua estrutura física, composta por agregados e poros. A estrutura do solo constitui um fator determinante para as comunidades biológicas, uma vez que cria habitats diferenciados que sustentam a diversidade de organismos e regulam as interações tróficas.

2.5. Importância da estabilidade do solo para a biodiversidade e fertilidade do solo

A heterogeneidade estrutural do solo condiciona a atividade microbiana e, por consequência, os processos químicos associados à decomposição e à ciclagem da matéria orgânica, de modo que a arquitetura do solo não é apenas produto da atividade biológica, mas também força motriz da dinâmica química e ecológica (Erktan; Or; Scheu, 2020). A estrutura física do solo é ao mesmo tempo causa e efeito das interações biológicas subterrâneas. Ela condiciona como os organismos se relacionam e, por sua vez, é continuamente remodelada por essas interações. Essa visão integrada reforça que a qualidade física do solo deve ser considerada junto com os aspectos químicos e biológicos para compreender e manejar a saúde dos ecossistemas terrestres.

A distinção entre sistemas naturais e manejados apresentada por Or, Keller e Schlesinger (2021), caracteriza a estrutura do solo como um “andaime frágil” que sustenta tanto a biologia quanto a química edáfica. Enquanto solos naturais funcionam como sistemas autorregulados e resilientes, os solos manejados apresentam uma estrutura mais instável e dependente de intervenções externas para manter sua produtividade. Os solos naturais apresentam uma estrutura formada predominantemente por processos biológicos e ecológicos, como o crescimento e morte de raízes, a atividade de microrganismos e a deposição contínua de matéria orgânica. Essa dinâmica gera bioporos estáveis, agregados resistentes e elevada heterogeneidade espacial, favorecendo a infiltração de água, a retenção de nutrientes e o acúmulo de MOS. Já os solos manejados, especialmente sob preparo mecânico, têm sua estrutura resultante da fragmentação física promovida pelo cultivo, o que cria condições homogêneas para germinação e crescimento inicial das plantas, mas rompe legados ecológicos e fragiliza agregados. A estabilidade estrutural do solo é um fator determinante para a biodiversidade e para a dinâmica e estabilização da MOS. Essa distinção ressalta que a integridade estrutural condiciona a retenção de carbono orgânico e a produtividade primária líquida, funcionando como suporte físico para

processos biogeoquímicos essenciais. A degradação estrutural, portanto, compromete simultaneamente a atividade biológica e a estabilidade química, reduzindo a resiliência dos sistemas agrícolas.

Hartmann e Six (2023) argumentam que a estrutura do solo e o microbioma são elementos indissociáveis para a manutenção das funções ecológicas em agroecossistemas. Práticas conservacionistas aumentam a estabilidade estrutural e sustentam microbiomas mais diversos e resilientes, enquanto sistemas intensivos reduzem a estabilidade dos agregados e comprometem a funcionalidade microbiana. Índices de estabilidade estrutural mostraram correlação significativa com a diversidade microbiana ($R^2 \approx 0,68$), evidenciando que atributos físicos e biológicos do solo estão intrinsecamente conectados. Assim, o manejo conservacionista não apenas preserva a estrutura física, mas também sustenta microbiomas mais funcionais, enquanto o manejo convencional compromete ambos os componentes, reduzindo a saúde e a sustentabilidade dos agroecossistemas. A saúde do solo deve ser avaliada de forma multidimensional, integrando atributos físicos e biológicos, e não apenas métricas químicas tradicionais. Bhattacharyya *et al.* (2021), observaram que mudanças no uso da terra alteram a geometria dos poros, a diversidade microbiana e a atividade enzimática, afetando diretamente a retenção e estabilização da MOS. O manejo agrícola intensivo reduz a biodiversidade e altera a estrutura da microbiota, enquanto sistemas menos perturbados mantêm maior equilíbrio ecológico (Stroher *et al.*, 2023).

2.6. Impactos do uso agrícola na matéria orgânica do solo

Os sistemas agrícolas tendem a reduzir significativamente os estoques de carbono em comparação com áreas sob vegetação natural. A intensificação do uso agrícola altera a composição da comunidade microbiana, reduzindo a diversidade funcional e comprometendo a ciclagem de nutrientes. Mudanças no uso da terra têm efeitos imediatos e duradouros sobre os estoques de carbono e a funcionalidade do solo. Em ecossistemas tropicais, Santos *et al.* (2019) demonstraram que a conversão

de vegetação de Mata Atlântica em pastagens resultou em perdas expressivas de carbono do solo, especialmente nas camadas superficiais. De forma semelhante, Don, Schumacher e Freibauer (2011) apontam que as maiores perdas de carbono orgânico do solo (COS) ocorrem na conversão de floresta primária em terras agrícolas (25%) e culturas perenes (30%), enquanto a conversão em pastagens reduz os estoques em 12%. Essas perdas, contudo, podem ser parcialmente revertidas por práticas como reflorestamento (129%), pousio agrícola (132%) ou conversão de áreas agrícolas em pastagens (126%).

A adoção de sistemas agrícolas mais diversos contribui para mitigar esses impactos. Em agroflorestas (Cezar *et al.*, 2015) e sistemas de consórcio (Cezar *et al.*, 2024; Leite *et al.*, 2021; Gamboa *et al.*, 2020; Veloso *et al.*, 2018), a heterogeneidade radicular promove maior aporte de carbono orgânico, estimula microrganismos benéficos e aumenta a resiliência ecossistêmica. Ao ampliar a diversidade de espécies cultivadas, as condições físicas e biológicas do solo são favorecidas, resultando em comunidades microbianas mais diversas e funcionais. No bioma Pampa, Machado *et al.* (2024) verificaram que a conversão de campos nativos em silvicultura e cultivos agrícolas (soja em sistema de plantio direto com culturas de cobertura) não alterou significativamente os estoques de carbono orgânico, sugerindo que o manejo adotado pode atenuar os efeitos negativos da mudança de uso da terra.

Práticas de manejo sustentáveis, como o uso de pastagens permanentes e rotações diversificadas, também contribuem para maior estabilidade dos estoques de carbono e para interações positivas entre atributos químicos e biológicos do solo (Wiesmeier *et al.*, 2015; Whitehead *et al.*, 2018). Em sistemas florestais, a cobertura contínua favorece maior biomassa e estabilidade funcional, sendo a manutenção de resíduos e a redução da perturbação física fundamentais para sustentar a atividade microbiana e o potencial de sequestro de carbono (Schnecker *et al.*, 2023). Nesse sentido, a manutenção da MOS deve ser entendida não apenas como estratégia de fertilidade, mas como elemento-chave para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Kumar *et al.*, 2017).

No caso específico do bioma Pampa, a região do ESRG sofreu intensa transformação da paisagem original da Floresta Estacional Semidecidual, hoje convertida majoritariamente em matriz agrícola. Apenas 16,97% da cobertura original corresponde a fisionomias florestais, enquanto campos (1,27%) e formações de transição (0,53%) completam os remanescentes, frente a 79,97% da área total ocupada por fisionomias agrícolas (Cordeiro; Hasenack, 2009). Apesar dessa redução drástica, o Pampa ainda abriga uma rica biodiversidade, embora sob forte ameaça. Andrade *et al.* (2023) alertam que, mesmo com mais de 12.500 espécies registradas, a biodiversidade do bioma encontra-se em risco devido à conversão de campos nativos em agricultura intensiva, ao sobrepastoreio e à fragmentação dos habitats. Alves (2024) analisou a evolução das coberturas nativas do Bioma Pampa entre 1985 e 2022 (incluindo formações florestais, campestres, campos alagados, áreas pantanosas e restingas arbóreas e herbáceas) e constatou que restavam apenas 55.806,77 km² de vegetação nativa. Esse valor corresponde a cerca de 31% da área originalmente ocupada pelo bioma, evidenciando que aproximadamente 69% de sua cobertura natural já havia sido suprimida até aquele ano, conforme os limites definidos pelo IBGE. Além disso, a substituição da vegetação nativa por sistemas agrícolas tem provocado perdas expressivas de MOS (Villela *et al.*, 2025), agravando os impactos ecológicos da transformação da paisagem.

2.7. A formação de Neossolos no Escudo Sul-Rio-Grandense

As perdas de matéria orgânica do solo são particularmente severas no ESRG, onde, em função da geologia e da declividade, predominam solos rasos e pedregosos, associados a afloramentos rochosos (Pedron *et al.*, 2025). Na porção leste do ESRG, denominada Batólito Pelotas, formaram-se Neossolos Litólicos e Regolíticos. O Batólito Pelotas foi descrito por Philipp *et al.* (2002) como um corpo granítico polifásico e multi-intrusivo, com cerca de 40.000 km², de área aflorante em território gaúcho, inserido em uma estrutura maior de grandes dimensões com aproximadamente 800 km de

comprimento e 150 km de largura média, orientada na direção nordeste. Formada entre 630 e 550 Ma, essa unidade está subdividida em diversas suítes intrusivas e graníticas, entre elas Pinheiro Machado, Erval, Viamão, Dom Feliciano, Encruzilhada do Sul e Cordilheira (Pereira *et al.*, 2021).

A Suíte Pinheiro Machado (SPM), considerada a mais antiga do Batólito Pelotas, ocupa cerca de 30% de sua área e apresenta idades entre 625 e 610 Ma. A SPM possui afinidade cálcio-alcalina de médio a alto-K, com caráter metaluminoso a fracamente peraluminoso. Suas rochas variam de granodioritos a monzogranitos, com ocorrências subordinadas de tonalitos, dioritos e quartzo-dioritos, além de xenólitos de gnaisses e migmatitos (Philipp *et al.*, 2002). Os materiais de graníticos e de rochas granitoides apresentam grande heterogeneidade química e mineralógica. Essa mineralogia, rica em quartzo e feldspatos, condiciona diretamente a formação de solos rasos e arenosos, pouco evoluídos, que se enquadram na classe dos Neossolos.

Os solos desenvolvidos a partir da SPM apresentam baixa fertilidade natural herdada do material de origem e reduzido grau de evolução pedogenética. Essa condição resulta da associação entre a resistência dessas rochas às intempéries e a dinâmica da evolução de clima e relevo local. Esses fatores impediram o aprofundamento do perfil e o estabelecimento de características físicas nos solos mais favoráveis ao desenvolvimento dos cultivos. Além disso, estes solos apresentam menor capacidade de armazenamento e retenção de água. Esta característica é agravada quando os solos se originam de granitos de granulometria grossa, dos quais herdam uma textura grosseira com alto teor de cascalho. Apesar das limitações do material originário, possuíam sob cobertura vegetal natural no passado, condições que favoreciam a biociclagem, mantendo via MOS conteúdo de bases suficientes na superfície e uma estruturação que mitigava sua degradação física. Contudo, a conversão para sistemas de uso intensivo e menos compatível com a preservação das características naturais destes solos, especialmente em razão das diminuições da cobertura vegetal e matéria orgânica, resultou na degradação acelerada e no agravamento de suas limitações intrínsecas (Silveira, 2006).

A caracterização química de Neossolos Litólicos derivados das rochas graníticas do Batólito Pelotas, realizada por Silveira (2006), evidencia a influência da heterogeneidade litológica local e os marcantes processos de descontinuidade na interface solo-saprolito. Os perfis analisados ilustram a coexistência abrupta de horizontes A-C adjacentes a perfis mais evoluídos, em função de injeções ácidas e intermediárias lado a lado na paisagem. Ademais, refletem uma dinâmica de forte declividade e linhas de pedras que acentuam o rejuvenescimento do *solum*. A análise dos cátions totais e trocáveis revela um balanço nutricional desequilibrado. Enquanto os teores de cálcio e magnésio no solo representam em média, apenas 31% e 15% de suas reservas totais na rocha, apresenta elevados teores de potássio, devido à expressiva presença de feldspatos potássicos herdados da matriz granítica. Os perfis analisados evidenciam que o retrabalhamento superficial tende a homogeneizar os horizontes A, mascarando parcialmente a influência direta do saprolito subjacente na camada arável. Além disso, a acentuada transferência e perda seletiva de argilas predispõe essas áreas a elevados riscos de degradação física e erosão hídrica.

Os Neossolos derivados desse embasamento granítico refletem o estágio inicial de intemperismo e a forte influência do material de origem. Pereira *et al.* (2021) apontam que os granitos da região apresentam baixo grau de alteração (IQA ~60)³, e que o transporte fluvial reduz ainda mais os índices de intemperismo nos sedimentos, resultando em solos jovens, quimicamente pobres e de baixa capacidade de retenção de água e nutrientes. Essa condição é corroborada por Medeiros *et al.* (2013), que caracterizaram Neossolos Litólicos com perfis rasos, textura franco-arenosa, acidez elevada (pH < 5,5), baixa saturação por bases (< 20%) e alta saturação por alumínio (> 60%). Além disso, os óxidos de ferro e alumínio presentes nos horizontes mais

³ O índice de alteração química – IQA (*Chemical Index of Alteration* — CIA), descreve o grau de transformação de feldspatos em argilominerais, pela remoção de Ca^{2+} , Na^+ e K^+ em relação ao Al. Altos valores de IQA refletem a remoção de cátions móveis ou instáveis (Ca, Na, K) em relação aos constituintes residuais altamente imóveis ou estáveis durante o intemperismo. Por outro lado, valores baixos de IQA indicam ausência de alteração química e, conseqüentemente, podem refletir condições de clima frio e/ou árido na área fonte. Valores de IQA entre 50 e 60 indicam intemperismo incipiente; IQA entre 60 e 80 indica intemperismo intermediário; IQA acima de 80 indica intemperismo intenso; e IQA=100 indica intemperismo extremo, com a remoção completa de elementos alcalinos e alcalino-terrosos da matriz da rocha (Pereira *et al.*, 2021).

intemperizados promovem forte fixação de fósforo, restringindo sua disponibilidade às plantas.

A pedogênese dos Neossolos formados sobre a SPM evidencia como a geologia do ESRG condiciona diretamente a paisagem pedológica atual. Os Neossolos graníticos são solos jovens, rasos e de baixa fertilidade natural, cuja utilização agrícola depende de práticas de manejo intensivo, como calagem, adubação fosfatada e incorporação de matéria orgânica, para viabilizar uma produção sustentável.

2.8. Neossolos: importância e limitações

Os Neossolos são a terceira classe de solos de maior relevância no Brasil e ocupam uma área correspondente a 13,28% do território nacional, com aproximadamente 1.130.776 km² de extensão (Anjos *et al.*, 2012). Os Neossolos são solos de formação recente, desenvolvidos a partir de diferentes tipos de rocha e encontrados sob variadas condições de relevo e drenagem (Streck *et al.*, 2018). No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos *et al.*, 2018), os Neossolos estão divididos em quatro subordens: Litólicos, Regolíticos, Flúvicos e Quartzarênicos. Os Neossolos ocorrem em todas as regiões do país, embora sem constituir representatividade espacial expressiva, ou seja, ocorrem de forma dispersa em ambientes específicos, como é o caso dos Neossolos Flúvicos, que se localizam em planícies às margens de lagos e rios. Em relevos muito acidentados (regiões de serra e morros) destacam-se Neossolos Litólicos e Regolíticos, enquanto nas regiões litorâneas ocorrem Neossolos Quartzarênicos (Nascimento *et al.*, 2024).

No Rio Grande do Sul (RS) os Neossolos são a segunda classe de solos com maior ocorrência (Rio Grande do Sul, 2024). Os Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) constituem, aproximadamente, 20% do território do Estado (Pedron; Azevedo; Dalmolin, 2012), sem considerar suas associações com outras unidades, como por exemplo, a associação Chernossolo-Neossolo (Ciríaco – Charrua) que sozinha abrange 11,86 % do estado (Medeiros *et al.*, 2007). Os Neossolos situam-se numa extensa área

de relevo declivosos no rebordo do Planalto, desde a Serra Gaúcha, estendendo-se para oeste até as Missões (Santos *et al.*, 2018). Os RL e RR ocorrem em importantes áreas de produção agrícola e de desenvolvimento urbano (Nascimento *et al.*, 2024).

No bioma Pampa ocorrem todas as classes de Neossolos. Na região da Serra do Sudeste ocorre outra área expressiva de Neossolos e, na Campanha Gaúcha, os RL e RR ocorrem em relevo suave e área extensa entre os municípios de Quaraí, Uruguaiana, Alegrete e Santana do Livramento. Dentre as classes de solos do bioma, os Neossolos estão entre os mais suscetíveis a perdas de C pelo uso e manejo inadequado, com severas limitações ao uso agrícola e não agrícola (Dalmolin; Pedron; Flores, 2019). Os RL e RR são solos rasos, geralmente de gênese autóctone, predominando em relevos mais declivosos, com elevada pedregosidade e rochiosidade (Pedron *et al.*, 2025; Pedron; Dalmolin; Flores, 2019). Distinguem-se pela ausência de horizonte B diagnóstico (Miguel *et al.*, 2024) e profundidade do contato lítico que, nos RL ocorre até 50 cm da superfície, enquanto nos RR aparece abaixo dessa profundidade (Santos *et al.*, 2025).

Os Neossolos Litólicos e Regolíticos localizados no ESRG são solos que, em geral, transitam entre texturas franco arenosas e franco-argiloarenosas. Por localizarem-se em relevos declivosos, possuem baixa profundidade no horizonte superficial, acentuada pedregosidade e eventual presença de afloramentos rochosos no terreno. Neossolos mais argilosos podem apresentar boa fertilidade natural, mas os de textura arenosa, geralmente, são de baixa fertilidade (Pedron; Dalmolin; Flores, 2019). Essas características impõem severas limitações ao uso agrícola destes solos. Por sua fragilidade inerente, Nascimento *et al.*, (2024) e Streck *et al.* (2018), consideram que Neossolos deveriam ser destinados a conservação ambiental.

Solos frágeis como os RL e RR, são sistemas edáficos com baixa resiliência e alta susceptibilidade à degradação física, química e biológica, especialmente quando submetidos a pressões antrópicas ou ambientais. Isso significa que eles têm baixa capacidade de suportar distúrbios sem perda significativa de suas funções ecológicas (Albuquerque *et al.*, 2015). Nestes solos, a menor quantidade de argilominerais pode ser compensada, em parte, pelo maior potencial de aporte de fitomassa pelas culturas e

pela adoção de práticas de manejo com menor revolvimento do solo. O incremento de carbono orgânico nestes solos favorece a formação e estabilização de agregados. Isso acontece porque a adição de compostos orgânicos satura rapidamente os poucos sítios de ligações organominerais presentes, promovendo a união e estabilização das partículas. Em contrapartida, a predominância da fração areia torna esses solos, em geral, mais pobres em nutrientes e baixa saturação por bases, limitando o crescimento da biota do solo e aumentando o tempo de residência da MOS. Em RL e RR o carbono orgânico é o principal agente responsável pela formação e estabilidade dos agregados, principalmente na camada superficial. A MOS fornece substrato energético que possibilita a atividade de fungos bactérias e organismos da macrofauna (Lima; Kaiser, 2023). Nestes ambientes, a diversidade de sistemas radiculares é fundamental para sustentar a biologia edáfica, promover interações positivas com atributos químicos e físicos e garantir a estabilidade estrutural necessária à manutenção da produtividade agrícola e da saúde e qualidade do solo.

Em geral, os estudos desenvolvidos nestas áreas estão ligados à sua gênese e classificação, descrevendo aspectos morfológicos e a composição mineralógica e físico-química destes solos. Ainda são poucos os estudos realizados com o intuito de avaliar os impactos do uso e manejo de Neossolos (Menezes, Silva, 2008; Figueirêdo Neto *et al.*, 2022). No RS os estudos já desenvolvidos estão relacionados aos Neossolos da Região do Planalto constituída, basicamente, por rochas basálticas e arenitos. Entre os Neossolos registrados para o Bioma Pampa por Pedron, Dalmolin e Flores (2019), são referidos Neossolos formados a partir de basaltos, arenitos e sedimentos arenosos e fluviais.

2.9. Restrições ao uso agrícola de Neossolos

As principais limitações ao uso agrícola dos Neossolos RL e RR devem-se ao relevo declivoso, a pouca profundidade, a pedregosidade e a eventual presença de afloramentos rochosos no terreno. Como ressaltam Pedron, Dalmolin, Flores (2019),

Neossolos RL mais argilosos, podem apresentar boa fertilidade natural, mas os de textura arenosa geralmente são de baixa fertilidade. Em paisagens montanhosas de relevo forte ondulado, os Neossolos RL e RR, apresentam fortes restrições ao desenvolvimento de culturas anuais. Estas formações além de apresentarem afloramentos rochosos e elevada pedregosidade, apresentam pouca profundidade efetiva, resultando em limitado armazenamento de água e restrições ao desenvolvimento radicular. Contudo, Dalmolin; Pedron; Flores (2019), reconhecem que Neossolos RL podem, com práticas de melhoramento, serem utilizados para florestamento ou pastagens. Estas condições tornam os Neossolos mais suscetíveis a processos erosivos e impõem severas restrições à mecanização agrícola. Por estas razões, Nascimento *et al.* (2024) sugerem que Neossolos deveriam ser utilizados para preservação da flora e fauna silvestres. A mesma consideração é feita por Streck *et al.* (2018), que sugerem que Neossolos RL com sequência de horizontes A-R, deveriam ser destinados à preservação permanente.

As limitações dos Neossolos RR são menos intensas que as dos Neossolos RL (Dalmolin; Pedron; Flores, 2019). Entretanto, como destacam estes autores, as limitações, principalmente em termos de fertilidade, mecanização e aquelas decorrentes da textura arenosa, colocam este solo como classe máxima no sistema de capacidade de uso das terras, correspondente a 3(a)(b) – com severas limitações para culturas anuais. Contudo, enfatizam que, em alguns casos podem ser utilizados para fins agrícolas (como cultivos perenes, por exemplo, silvicultura e/ou pastagens), desde que aplicadas práticas com mínima movimentação do solo, adequadas à conservação do solo e da água. Em relação ao uso sustentável e a conservação destes solos, Streck *et al.* (2018) preceituam que áreas com declividade de 15% a 25% podem ser utilizadas para pastoreio e, áreas com declividades entre 25% e 45%, destinadas ao reflorestamento ou fruticultura. As áreas com declividade superior a 45% deveriam ser destinadas à conservação da vegetação nativa.

Em escalas regionais e paisagísticas, as variações na textura e mineralogia do solo devido à topografia, geomorfologia e diferenças no material de origem, afetam processos como a agregação do solo e a complexação organomineral, que protegem a

MOS da decomposição e levam ao acúmulo de carbono orgânico no solo (Mayes *et al.*, 2014). Além disso a conversão de áreas de vegetação nativa à agricultura, altera drasticamente a biodiversidade do solo e a estabilidade dos ecossistemas. Neste cenário, é importante avaliar os impactos que diferentes sistemas de uso agrícola do solo podem ocasionar na dinâmica da MOS.

2.10. Formação da vegetação nativa do bioma Pampa

Em Neossolos ainda são escassos os estudos comparativos sobre os efeitos da vegetação e do uso alternativo do solo na composição da MOS. Na região leste do ESRG, onde predominam Neossolos Litólicos e Regolíticos desenvolvidos sobre rochas graníticas e gnáissicas, inexistem investigações dessa natureza. A distribuição e o grau de evolução desses solos no extremo sul do Brasil estão intimamente relacionados à dinâmica paleovegetacional e às oscilações climáticas do Quaternário Tardio. Durante o Último Máximo Glacial e o início do Holoceno, o clima mais frio e seco favoreceu a hegemonia de estepes e savanas campestres (Behling, 2002; Pillar, 2003). Nessas condições de restrição hídrica e baixa atividade arbórea, o intemperismo químico foi limitado, sugerindo que os Neossolos Litólicos sob pastagens naturais representam heranças pedológicas desse período seco, preservando superfícies pouco evoluídas e rasas na paisagem. Em contraste, a transição para um clima mais úmido no Holoceno Médio e Tardio promoveu a expansão das formações florestais sobre a matriz campestre ancestral (Behling, 2002; Pillar, 2003; Behling; Pillar; Bauermann, 2009).

A chegada e a fixação de formações florestais em latitudes mais ao sul do RS, alcançando regiões como o ESRG, são explicadas por uma combinação de mudanças paleoclimáticas históricas, rotas de migração ecológica e a existência de microclimas favoráveis. O aumento das temperaturas no holoceno tardio permitiu o avanço das formações florestais. Entretanto, embora as mudanças nas condições climáticas tenham criado condições mais favoráveis à expansão florestal as limitações impostas

pelas encostas íngremes e a frequência de afloramentos rochosos na região do ESRG (Jurinitz; Jarenkow, 2003) limitaram a expansão destas áreas.

A expansão das florestas em altas latitudes na região do Pampa, no RS, se deu por vias de dispersão natural ao longo dos cursos d'água e dispersão de sementes por vetores bióticos. A ampliação destas áreas dependeu diretamente da fauna (aves, pequenos roedores terrestres etc.) que atuou de forma ativa na dispersão de sementes pesadas, facilitando o nascimento de novos núcleos florestais cada vez mais distantes da floresta contínua original. Variáveis abióticas associadas ao relevo e ao solo podem modificar condições microclimáticas que por sua vez favorecem o estabelecimento de espécimes arbóreos numa matriz predominantemente campestre. A colonização e estabelecimento de vegetação florestal em campos pode, portanto, ocorrer a partir da expansão da borda ou por nucleação e posterior coalescência dos núcleos florestais, culminando no predomínio de uma vegetação florestal em detrimento de mosaicos campo-floresta (Schinestsck; Müller; Pillar, 2019).

Essa mudança biótica introduziu novos fatores pedogenéticos, como sistemas radiculares mais profundos e maior aporte diferenciado de resíduos florestais, aceleraram as taxas de alteração mineral e a diferenciação de horizontes. Assim, os Neossolos Regolíticos refletem uma evolução pedológica ativa e contemporânea, moldada pelo avanço florestal sobre os campos do Pampa. Compreender a tensão entre solos relictos e solos em evolução ativa é essencial para avaliar como o manejo antrópico atual impacta a resiliência dos estoques de carbono orgânico diante das transformações históricas do bioma.

2.11. Cultivos agrícolas em Neossolos Litólicos e Regolíticos do ESRG

Este estudo foi desenvolvido no interior de Pelotas, RS, na região leste do ESRG, em pequenas propriedades rurais de base familiar. Nessas áreas, a atividade agrícola é conduzida predominantemente sobre Neossolos Litólicos e Regolíticos, solos rasos e pedregosos que condicionam práticas produtivas específicas. Em Pelotas e

região consolidou-se uma tradição agrícola marcada pelo cultivo de pomares de pessegueiro (*Prunus persica*), frequentemente associados ao milho nas entrelinhas durante os primeiros anos de implantação do pomar, além de áreas destinadas ao pastoreio para produção leiteira. Para o estabelecimento destas propriedades, muitas áreas de florestas foram convertidas em áreas agrícolas. No RS, até quase o final da década de 1960, as “terras de mato” eram as preferidas para o cultivo, ficando as “terras de campo” como última opção para uso com lavouras. As áreas de campo foram incorporadas ao uso agrícola após a difusão da aplicação de corretivos da acidez e fertilizantes aos solos (Kämpf; Curi, 2012).

O RS é atualmente o maior produtor de pêssegos do Brasil. Em 2024 foi responsável por 64,94% da produção nacional (123.633 t), desenvolvida em uma área de 8.436 ha (IBGE, 2024). De acordo com o Censo Agropecuário (IBGE, 2017), existem 3.117 propriedades rurais destinadas à produção de pêssegos no Estado, das quais os municípios da metade sul (Pelotas, Canguçu e Morro Redondo), concentram 26,15% dos estabelecimentos produtivos. Juntos, esses municípios produziram 36.634 toneladas em 2017, correspondendo a 19,24% da produção nacional. Pelotas destaca-se como o maior produtor nacional, responsável por 13,4% da produção brasileira e com o maior número de produtores (512). No cenário internacional, o Brasil ocupa a 13ª posição mundial no cultivo de pêssegos, com cerca de 1% da produção global (Belarmino; Navarro-Pabsdorf, 2022). Essa características regionais evidenciam como os Neossolos sustentam sistemas agrícolas de relevância econômica e cultural, mas também de elevada vulnerabilidade ambiental. A partir dessa contextualização, os capítulos seguintes aprofundam a análise das propriedades físicas, químicas e biológicas dos Neossolos Litólicos e Regolíticos, avaliando a estabilidade da MOS em diferentes agroecossistemas e sua ao uso agrícola e aos impactos sobre a sustentabilidade dos sistemas produtivos familiares da região.

3. Capítulo 1 – Estabilidade do carbono do solo em Neossolos do Bioma Pampa, Brasil

3.1. Introdução

As mudanças climáticas, caracterizadas por temperaturas mais elevadas e pela intensificação de eventos extremos (Richardson *et al.*, 2023; Van Gils, 2020), têm provocado impactos severos sobre áreas agrícolas, resultando em perdas significativas de solo cultivável. A conservação do solo, neste contexto, exige práticas de manejo capazes de preservar funções ecológicas e recuperar serviços ecossistêmicos essenciais à sustentabilidade agrícola e ambiental. Estima-se que cerca de 8% dos estoques globais de matéria orgânica do solo (MOS) foram perdidas nos últimos 12.000 anos (Sanderman; Hengl; Fiske, 2017), sobretudo em função da agricultura e das mudanças climáticas (Poeplau; Dechow, 2023). O metro superior do solo pode armazenar aproximadamente três vezes mais carbono do que a atmosfera e quase o dobro do que a biomassa vegetal (Bacar *et al.*, 2022), reforçando seu papel estratégico como sumidouro de carbono. Apesar desse potencial, os solos figuram entre os recursos mais vulneráveis do planeta, em razão da conversão de áreas nativas, da degradação da terra e da redução da biodiversidade.

A compreensão da dinâmica da MOS tem avançado com a distinção entre matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) (Cotrufo *et al.*, 2019; Lavalley; Soong; Cotrufo, 2019). A textura do solo é determinante para a estabilização do carbono. Solos argilosos favoreceram a incorporação de carbono em MOAM, garantindo maior persistência a longo prazo, enquanto, solos arenosos mostraram menor capacidade de retenção mineral, concentrando o carbono

em MOP (Haddix *et al.*, 2020). Entretanto, existe um limite máximo de acúmulo de carbono orgânico que pode ser estabilizado em associação com minerais e agregados, condicionado pela capacidade físico-química do solo (Six *et al.*, 2002; Stewart *et al.*, 2007). Os sistemas agrícolas, por estarem mais distantes da saturação, oferecem maior oportunidade de recarbonização, ao passo que os solos florestais já atingiram seu limite de estabilização (Chen *et al.*, 2019). Além disso, resíduos radiculares apresentam maior potencial de estabilização do que resíduos da parte aérea, reforçando o papel das raízes na formação da MOS persistente (Jackson *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2017).

O desempenho do manejo dos solos em diferentes sistemas de cultivo agrícola pode ser avaliado por meio do índice de manejo de carbono (IMC) proposto por Blair *et al.* (1995). O IMC resulta da interação entre o estoque de carbono do solo e sua labilidade, sendo amplamente utilizado para avaliar a qualidade dos sistemas de cultivo. Tradicionalmente, a labilidade é estimada pelo carbono oxidável por permanganato (CPOx), conforme Weil *et al.* (2003). Contudo, estudos recentes (Christy *et al.*, 2023) apontam que o CPOx não representa adequadamente a fração lábil disponível para a atividade microbiana, o que limita sua aplicabilidade. Nesse contexto, o fracionamento físico da matéria orgânica surge como alternativa, permitindo distinguir o carbono lábil (C-MOP) do não lábil (C-MOAM). Vieira *et al.* (2007) demonstraram que o IMC baseado no fracionamento físico granulométrico é uma ferramenta sensível, apresentando forte correlação ($r = 0,88$) com atributos físicos, químicos e biológicos do solo, o que reforça sua potencialidade para avaliar a sustentabilidade dos sistemas de manejo.

Sistemas produtivos fundamentados no alto aporte e na manutenção de resíduos vegetais nas áreas cultivadas e o não revolvimento ou mínima mobilização do solo (Bayer; Mafra, 2023), ampliam os estoques de MOP da MOS e melhoraram a fertilidade natural e a estabilidade estrutural. Embora diferentes culturas geralmente tenham um efeito característico semelhante na função geral do solo, elas também apresentam diferenças às práticas de cultivo específicas (Evangelou; Giurga, 2024). As práticas de manejo agrícola podem afetar os estoques de carbono do solo por meio de alterações na produção primária líquida, nas proporções de biomassa removida, no grau de estabilização do carbono no solo e em alterações na taxa de decomposição (Whitehead

et al., 2018). Nesse sentido, práticas agronômicas conservacionistas podem contribuir para o sequestro de carbono no solo, permitindo que a agricultura desempenhe papel tanto na mitigação das mudanças climáticas quanto na adaptação a elas (Angers *et al.*, 2022). As estratégias de manejo devem ser adaptadas ao grau de saturação de C, à mineralogia e ao tipo de ecossistema, reconhecendo que tanto MOP quanto MOAM são cruciais para maximizar o potencial dos solos como sumidouros de carbono. O manejo direcionado apenas à MOAM é insuficiente porque as vias de formação da matéria orgânica persistente do solo são diversas e variam com as condições ambientais. O manejo eficaz também deve considerar a MOP. Em muitos solos, existe potencial para ampliar os estoques de MOP, que pode persistir por longos períodos e pode ser um precursor direto da MOAM (Angst *et al.*, 2023).

No Brasil, o bioma Pampa sofreu perdas expressivas de MOS em decorrência da conversão da vegetação nativa para sistemas agrícolas. Apesar do potencial de recarbonização ser relativamente baixo ($\approx 4\%$ do potencial nacional), sua sensibilidade ao manejo abre espaço para ganhos significativos de carbono por meio de práticas conservacionistas (Villela *et al.*, 2025). Dentre as classes de solos do bioma, os Neossolos estão entre os mais suscetíveis a perdas de C pelo uso e manejo inadequado, com severas limitações ao uso agrícola e não agrícola (Dalmolin; Pedron; Flores, 2019; Streck *et al.*, 2018). No RS, cerca de 20% do território é constituído por Neossolos Litólicos (RL) e Regolílicos (RR) (Pedron; Azevedo; Dalmolin, 2012). Apesar de sua ampla representatividade, os Neossolos ainda são pouco conhecidos, especialmente RL e RR derivados de rochas graníticas e gnáissicas (Barbosa, 2022; Pagani Junior, 2022; Lemos, 2020; Fehrenbach *et al.*, 2019).

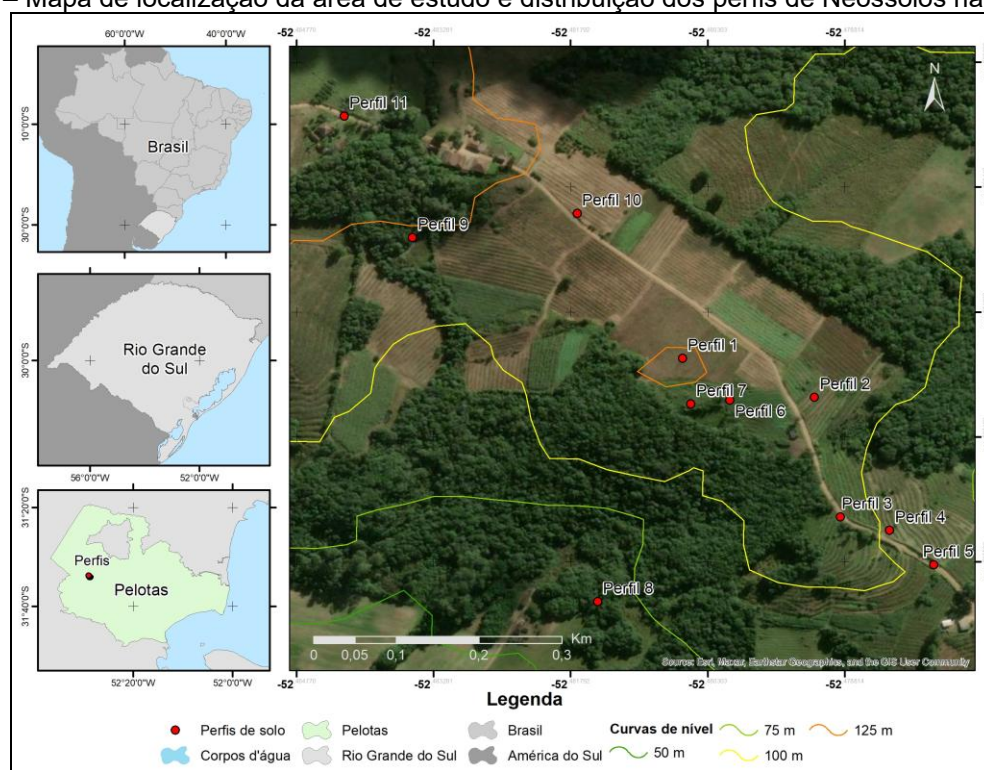
Devido à baixa proporção de argila e predominância da fração areia, a MOS é um componente essencial para a qualidade e a fertilidade desses solos. Contudo, inexistem estudos que caracterizem a estabilidade da MOS em diferentes usos do solo em RL e RR. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar se os teores de carbono e frações físicas da MOS, diferem entre Neossolos Litólicos e Regolílicos da região leste do ESRG, em diferentes agroecossistemas. Especificamente, buscou-se

verificar se Neossolos Litólicos e Regolíticos apresentam diferenças nas frações granulométricas e na altimetria dos perfis no relevo.

3.2. Material e métodos

Os Neossolos avaliados neste estudo estão situados, no interior de Pelotas, na localidade do Quilombo, sétimo distrito de Pelotas, RS. A área possui 54 ha, abrangendo três propriedades rurais com sistema de produção agrícola de base familiar (Figura 3.1). O clima regional é descrito como Cfa (clima temperado úmido com verão quente), conforme a classificação de Köppen. A precipitação média anual varia entre 1300 e 1600mm (Wrege *et al.*, 2012).

Figura 3.1 – Mapa de localização da área de estudo e distribuição dos perfis de Neossolos na paisagem



Fonte: elaborado pelo autor

3.2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo está inserida no Bioma Pampa e caracteriza-se como uma região de transição entre campos e florestas. As feições florestais prevalecem apenas na porção leste do Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG), devido à sua proximidade com o mar, que leva umidade até a região. Já no topo do ESRG e porção oeste, os campos predominam, ocorrendo florestas de galeria próximos aos rios e fundo de vales (IBGE, 2019).

A região congrega uma grande complexidade geológica, típica da província geomorfológica do ESRG. Consequentemente, as propriedades rurais da localidade caracterizam-se por uma ampla diversidade pedológica. O relevo da região varia entre plano à forte ondulado, com predomínio de relevo ondulado, transicionando para forte ondulado na área de mata nativa (Figura 3.1). A altitude varia entre 41 e 177 metros acima do nível médio do mar, com as maiores altitudes situando-se ao norte da área, com ocorrência de solos mais rasos e, ao sul, encontram-se solos mais profundos, em menores altitudes.

3.2.2. Levantamento e classificação dos solos

A descrição, caracterização e classificação taxonômica dos perfis de Neossolos foram realizados por Barbosa (2022) e Pagani Junior (2022), conforme os procedimentos normativos para levantamentos pedológicos (Santos *et al.*, 1995) e constitui o Anexo A. Os perfis foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos *et al.*, 2025) e com o *World Reference Base for Soil Resources* (IUSS Working Group WRB, 2015). Ao todo foram caracterizados 11 perfis de solos completos (Tabela 3.1), identificados entre dezembro de 2020 e abril de 2022.

A maior parte da área de estudo está ocupada por mata nativa (42%), seguido pelos usos com fruticultura (cultivo de pêssego em pomares) que ocupa 31,6% da área e 20,4% correspondem a pastagens nativas, destinadas à produção leiteira. Os

restantes 6% são cultivados com culturas anuais, intercalando o cultivo de soja e milho. As áreas foram classificadas segundo o sistema de uso típico adotado em cada propriedade avaliada, nas seguintes categorias: Campo Nativo, Lavoura, Lavoura/Pomar, Pomar e Mata Nativa. No P2 o uso é predominantemente com lavouras anuais (milho) e pousio no inverno com desenvolvimento de cultivos espontâneos (azevém). Nos perfis P3, P4, P5 e P6 predominavam o cultivo de pessegueiro (em estágio inicial de desenvolvimento), que ocorre em consórcio com lavouras de milho (Barbosa, 2022). As áreas dos perfis P7 e P10 são ocupadas por pomares maduros. Os demais perfis são ocupados por campo nativo (P1 e P11) e mata nativa (P8 e P9). O histórico de uso e manejo do solo, adotado em cada área, está descrito detalhadamente no Apêndice A.

Tabela 3.1 – Identificação dos perfis, tipo de relevo, altimetria e profundidade dos perfis, classificação taxonômica e uso do solo, em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG

Perfil	Relevo	Elevação (m)	Profundidade (cm)	Classificação		Uso do Solo
				SiBCS	WRB	
P1	Ondulado	177	40	RLd	Dystric Leptosol	Campo sujo ⁴
P2	Ondulado	112	30/40	RLm	Mollic Leptosol	Lavoura
P3	Forte ondulado	101	73/83	RRe	Leptic Regosol	Lavoura/Pomar
P4	Ondulado	94	75/90	RRd	Leptic Regosol	Lavoura/Pomar
P5	Ondulado	87	70/97	RRd	Leptic Regosol	Lavoura/Pomar
P6	Ondulado	116	35/50	RLm	Mollic Leptosol	Pomar
P7	Ondulado	120	46/44	RLd	Umbric Leptosol	Pomar
P8	Ondulado	67	75/80	RRd	Leptic Regosol	Mata nativa
P9	Forte ondulado	119	52/78	RRd	Leptic Regosol	Mata nativa
P10	Ondulado	120	25/56	RLd	Dystric Leptosol	Pomar
P11	Ondulado	143	20	RLd	Dystric Leptosol	Campo nativo

Legenda: *d* – distrófico; *e* – eutrófico; *m* – chernozêmicos

Fonte: modificado de Barbosa (2022) e Pagani Junior (2022)

⁴ O P1, classificado como *campo sujo* por Barbosa (2022), é um tipo fisionômico exclusivamente arbustivo-herbáceo, com arbustos e subarbustos esparsos cujas plantas, muitas vezes, são constituídas por indivíduos menos desenvolvidos das espécies arbóreas. A fisionomia é encontrada em solos rasos como os Neossolos Litólicos, Cambissolos ou Plintossolos Pétricos, eventualmente com pequenos afloramentos rochosos de pouca extensão, ou ainda em solos profundos e de baixa fertilidade (álícos ou distróficos) como os Latossolos de textura média e Neossolos Quartzênicos (Ribeiro; Walter, 2008). No RS, conforme descrito por Overbeck *et al.* (2009) frequentemente os campos são diferenciados em *campo limpo*, onde prevalecem gramíneas (Poaceae) e ciperáceas, assim como muitas espécies herbáceas pertencentes a várias famílias botânicas; e *campo sujo*, onde além das gramíneas e herbáceas baixas ocorrem arbustos, principalmente da família Asteraceae (*Baccharis gaudichaudiana*, *B. uncinella*), e gravatás (*Eryngium* spp.; Apiaceae).

3.2.3. Análises laboratoriais

O fracionamento físico granulométrico da MOS seguiu o protocolo descrito por Mendonça e Matos (2017). A MOS foi dividida em duas frações: matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM). Foram utilizadas 10 g de terra fina seca ao ar (TFSA), misturadas a 30 ml de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}). A suspensão foi agitada por 15 horas em agitador ortogonal. Após a agitação, realizou-se o peneiramento úmido em peneira de $53 \mu\text{m}$. O material retido na peneira, correspondente à fração MOP, foi lavado três vezes com água destilada, seco em estufa a 70°C e, posteriormente, moído em almofariz de ágata para análise do teor de carbono (C).

A quantificação do carbono orgânico total (COT) e da fração C-MOP foi feita por oxidação com dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) em meio ácido, utilizando ácido sulfúrico como reagente em amostras de 0,5 g, seguida de aquecimento em bloco digestor a 170°C por 30 minutos. A titulação foi realizada com solução de sulfato ferroso amoniacal, utilizando o indicador Ferroin para determinar o ponto final. O teor de C foi calculado com base no volume de solução utilizado na titulação. O C-MOAM foi determinado pela diferença entre o COT e o C-MOP.

3.2.4. Índice de Manejo do Carbono

Para avaliar a qualidade do solo e as mudanças em resposta ao uso da terra utilizou-se o Índice de Manejo de Carbono (IMC), proposto por Blair, Lefroy e Lisle (1995), que incorpora tanto o COT quanto sua labilidade. O IMC foi calculado para cada sistema considerando-se o C-MOP como a porção lábil da MOS e C-MOAM como porção não lábil, conforme proposto por Vieira *et al.* (2007). Como sistema de referência para o cálculo do IMC utilizou-se uma área de mata nativa. O IMC foi calculado por meio da seguinte expressão:

$$\text{IMC} = \text{IEC} \cdot \text{IL} \cdot 100 \quad [1]$$

Onde:

$$\text{Índice de Estoque de Carbono (IEC)} = \frac{COT_{\text{Amostra}}}{COT_{\text{Referência}}} \quad [2]$$

$$\text{Labilidade (L)} = \frac{C_{\text{Lábil}}}{C_{\text{Não-lábil}}} \quad [3]$$

$$\text{Índice de Labilidade} = \frac{L_{\text{Amostra}}}{L_{\text{Referência}}} \quad [4]$$

3.2.5. Déficit de carbono no solo

Para avaliar os resultados estimados para o IMC em cada perfil de solo, foi calculado o déficit de saturação de C (DSC) por meio da equação 5 (Stewart *et al.*, 2007). O potencial de associação da MOS aos minerais foi obtido por meio da equação de regressão desenvolvida por Six *et al.* (2002) estimada para áreas de pastagens, conforme sugerido por Lavallee *et al.* (2018).

$$\text{Déficit de Saturação (DSC)} = 1 - \frac{C - MOAM_{\text{Medido}}}{C - MOAM_{\text{Potencial}}} \quad [5]$$

onde: $C - MOAM_{\text{Medido}}$ é o C total associado às frações de silte mais argila (C nas duas frações combinadas) em um determinado perfil do solo e $C - MOAM_{\text{Potencial}}$ é obtida por meio da equação 6,

$$C - MOAM_{\text{Potencial}} = 16,33 + 0,32 [\text{silte} + \text{argila} (\%)] \quad [6]$$

A equação proposta por Six *et al.* (2002) foi originalmente desenvolvida para áreas de pastagens em solos de textura média a fina. Sua aplicação em Neossolos Litólicos e Regolíticos, caracterizados por baixa profundidade, elevada pedregosidade e predominância da fração areia, requer cautela. Esses atributos podem limitar a capacidade de associação da MOS às frações minerais, resultando em valores de DSC que não refletem plenamente a realidade local. Além disso, a equação assume uma relação linear entre o teor de silte+argila e o potencial de estabilização de carbono, o que pode não se aplicar em solos rasos e heterogêneos como os Neossolos do ESRG. Nesse sentido, as estimativas obtidas por meio da equação devem ser interpretadas

como uma comparação entre sistemas de uso, e não como um valor absoluto de saturação.

3.2.6. Estoques de carbono orgânico do solo

O estoque de carbono orgânico do solo (EC) foi calculado para os horizontes superficiais dos Neossolos por meio da equação 7 (Fernandes; Fernandes, 2009). Foram descontados os percentuais relativos aos fragmentos grosseiros (cascalhos e calhaus), conforme descrito por Fenton *et al.* (2024). Para comparação mais acurada dos EC foi realizada a correção por massa equivalente (Fowler *et al.*, 2023, Don; Schumacher; Freibauer, 2011).

$$\text{Estoque de Carbono Orgânico no Solo (EC)} = \frac{(\text{COT} \cdot \text{Ds} \cdot p)}{10}, \quad [7]$$

onde: EC representa o carbono acumulado no solo (Mg ha^{-1}); COT, indica o teor de carbono na camada (g kg^{-1}); Ds a densidade do solo (Mg m^{-3}) e p é a profundidade (cm) do horizonte superficial do perfil em análise.

A remoção relativa ao percentual de fragmentos grosseiros e a correção por massa equivalente foram aplicadas para garantir comparações adequadas dos EC. Os Neossolos, por apresentarem horizontes superficiais rasos e elevada pedregosidade, tendem a superestimar ou subestimar os valores de carbono quando calculados apenas em função da profundidade e densidade do solo. A exclusão da fração inerte (cascalhos e calhaus) evita inflar artificialmente os estoques, enquanto a correção por massa equivalente permite comparar perfis com diferentes profundidades e densidades de forma fidedigna.

3.2.7. Análise estatística

Foi utilizado um conjunto total de dados constituído por 14 indicadores químicos (pH, COT, C-MOP, C-MOAM, Ca, Mg, K, SB, Al, H+Al, CTC, V%, m%, P_{assimilável}), sete físicos (areia, silte, argila, fragmentos grosseiros, densidade do solo, macro e microporosidade), quatro indicadores de qualidade (MOP:MOAM, IMC, DSC, EC) e dois ambientais (altitude e profundidade do horizonte superficial de cada perfil). O conjunto das variáveis foi submetido inicialmente a uma análise exploratória de dados e, posteriormente, foram realizados testes de normalidade (Shapiro-Wilk e Anderson-Darling) e de homogeneidade de variâncias (teste de Levene para médias e medianas). As variáveis foram comparadas entre as classes de Neossolos (RL x RR) por meio do teste t de Welch, adequado à pequenas amostras e ausência de homoscedasticidade e do teste de Mann-Whitney (U), menos sensível à presença de *outliers*, para avaliar a diferença entre as medianas das distribuições, com base na ordenação de postos (*R*). Para todas as análises foi considerado o nível de significância $\alpha = 0,05$.

Em complementos aos testes de comparação, foram calculados índices que expressam a magnitude e a estrutura da variabilidade observada. O Ômega Quadrado (ω^2) foi utilizado como medida de tamanho de efeito, indicando a proporção da variância total explicada pelos fatores em análise (equação 8) (Fan; Konold, 2010). Já o coeficiente de correlação intraclass (ICC) foi aplicado para avaliar a consistência interna dos grupos, expressando a proporção da variabilidade atribuída às diferenças entre eles em relação à variabilidade total (equação 9) (Xian; Zhang, 2025).

$$\omega^2 = \frac{SQ_{entre} - (g_{entre} \cdot Q_{Merro})}{SQ_{total} + Q_{Merro}} \quad [8]$$

Onde: SQ_{entre} é a Soma de Quadrados entre grupos (variabilidade explicada pelo fator); g_{entre} são os graus de liberdade entre grupos (número de grupos – 1); Q_{Merro} é o Quadrado Médio do erro (variabilidade média dentro dos grupos); SQ_{total} é a Soma de Quadrados total (variabilidade total observada). O tamanho do efeito foi considerado pequeno ($\omega^2 < 0,20$); moderado ($0,20 \leq \omega^2 < 0,40$), grande ($0,40 \leq \omega^2 < 0,60$) e muito grande ($\omega^2 > 0,60$).

$$ICC = \frac{\sigma_{\text{grupo}}^2}{\sigma_{\text{grupo}}^2 + \sigma_{\text{erro}}^2} \quad [9]$$

Onde: σ_{grupo}^2 é variância entre grupos; σ_{erro}^2 é a variância do erro. O σ_{grupo}^2 é obtido pela seguinte equação [10]:

$$\sigma_{\text{Grupo}}^2 = \frac{QM_{\text{entre}} - QM_{\text{dentro}}}{n} \quad [10],$$

onde: QM_{entre} é a média dos quadrados entre grupos; QM_{dentro} é a média dos quadrados dentro dos grupos e n é o número médio de observações por grupo. Os resultados do ICC foram classificados como de baixa confiabilidade ($ICC < 0,25$); moderada confiabilidade ($0,25 \leq ICC < 0,50$), alta confiabilidade ($0,50 \leq ICC < 0,75$) e muito alta confiabilidade ($\geq 0,75$).

Para avaliar as relações entre as diversas variáveis físico-químicas com o COT e suas frações foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP) (Carvalho, 2024). Na seleção das componentes principais significativas foi utilizado o critério de Kaizer, (autovalores > 1) (Vicini *et al.*, 2018). Para reduzir a dimensionalidade e selecionar um subconjunto mínimo de variáveis mais influentes no conjunto de dados, foi adotada uma abordagem de ACP em duas etapas. Inicialmente, realizou-se uma ACP exploratória no conjunto completo de n variáveis. Na sequência, com base no critério de Kaizer e na variância acumulada, foram selecionados os componentes principais mais relevantes. As variáveis originais que apresentaram maiores cargas fatoriais (ou seja, maior valor absoluto de correlação) nesses componentes principais foram identificadas como as mais adequadas, indicando maior contribuição para a variância dos dados. Uma nova ACP foi realizada utilizando-se apenas o subconjunto de variáveis selecionadas no estágio 2. Esta abordagem permitiu reduzir a complexidade, mantendo a interpretabilidade das variáveis originais e maximizando a variância explicada.

3.3. Resultados

Os teores médios e o desvio padrão das frações texturais dos Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), estão apresentados na Tabela 3.2. Os Neossolos apresentaram teores de areia, variando de 511 g kg⁻¹ (P11) a 670 g kg⁻¹ (P5) e argila entre 77 g kg⁻¹ (P1) a 212 g kg⁻¹ (P11). Não foram detectadas diferenças estatísticas entre as frações texturais nem entre a densidade do solo e a microporosidade das duas classes de Neossolos. A homogeneidade das propriedades texturais de RL e RR reflete a gênese comum das áreas comparadas, com mesma matriz mineral e histórico geológico.

Entre as variáveis físicas, a comparação entre RL e RR, evidenciou diferenças significativas na macroporosidade, enquanto a microporosidade e a densidade do solo não apresentaram diferenças estatísticas. Os valores médios de macroporosidade foram consistentemente maiores nos RR, variando entre 0,35 e 0,43, enquanto nos RL oscilaram entre 0,15 e 0,27. Essa diferença foi confirmada pela análise da variação (ANOVA: F = 5,613; p = 0,04196), resultado corroborado pelo teste de Welch (p = 0,04741). A homogeneidade de variâncias foi confirmada pelos testes de Levene (p > 0,81), reforçando a robustez da análise. O coeficiente de correlação intraclassa (ICC = 0,458) e o valor de ω^2 (0,2955) indicaram efeito moderado da classe de solo sobre a macroporosidade (Apêndice B).

Dentre as variáveis químicas avaliadas, apenas os teores de cálcio e potássio apresentaram diferenças significativas (p < 0,05) entre as duas classes de Neossolos (Apêndice B). Esta distinção está evidenciada na Tabela 3.3, onde destaca-se a maior fertilidade dos Neossolos Litólicos em relação aos Regolíticos, com teores mais elevados destes macronutrientes e, conseqüentemente maior CTC.

Tabela 3.2 – Média ($\pm$ desvio padrão) das frações texturais (g kg⁻¹), da Densidade do solo (Ds, Mg m⁻³), macro e microporosidade (m³ m⁻³) do horizonte superficial de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) sob diferentes usos do solo, na região leste do ESRG

Classe	Areia	Silte	Argila	Ds	Ma	Mi
RL	572 ($\pm$ 52)	258 ($\pm$ 59)	147 ($\pm$ 48)	1,34 ($\pm$ 0,15)	0,13 ($\pm$ 0,04)	0,33 ($\pm$ 0,11)
RR	604 ($\pm$ 49)	245 ($\pm$ 34)	152 ($\pm$ 37)	1,32 ($\pm$ 0,12)	0,19 ($\pm$ 0,05)	0,25 ($\pm$ 0,04)

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 3.3 – Média ($\pm$ desvio padrão) das propriedades químicas ($\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) do horizonte superficial de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) sob diferentes usos do solo

Classe	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	SB	Al	H + Al	CTC
RL	5,71 ($\pm$ 0,38)	5,49 ($\pm$ 1,24)	1,87 ($\pm$ 1,15)	0,29 ($\pm$ 0,11)	7,73 ($\pm$ 2,11)	0,50 ($\pm$ 0,61)	8,15 ($\pm$ 3,09)	15,87 ($\pm$ 2,52)
RR	5,75 ($\pm$ 0,42)	3,15 ($\pm$ 1,01)	0,99 ($\pm$ 0,46)	0,15 ($\pm$ 0,01)	4,35 ($\pm$ 1,29)	0,32 ($\pm$ 0,36)	7,54 ($\pm$ 2,56)	11,88 ($\pm$ 2,67)

Fonte: elaborado pelo autor

Em relação à posição na paisagem os RL se situaram em cotas mais elevadas (112 – 177 m), contrastando com os RR, que se concentraram em altitudes mais baixas (67 – 119 m). Os resultados foram consistentes entre os diferentes testes (ANOVA, $F = 7,7$; $p = 0,02158$; Welch, $p = 0,01921$), com variâncias homogêneas (Levene: $p > 0,46$) e com efeito moderado a forte ($\omega^2 = 0,3785$; ICC = 0,551). Esses resultados indicam que a distribuição altimétrica está diretamente associada à gênese e diferenciação dos Neossolos do ESG. Isto implica em diferentes condições de drenagem, profundidade e dinâmica da MOS. Os resultados de macroporosidade, maior nos Neossolos Regolíticos está associada a uma estrutura mais porosa e potencialmente maior capacidade de infiltração e aeração, enquanto os Neossolos Litólicos, mais rasos, tendem a restringir esses atributos físicos, implicando em menor qualidade estrutural para o desenvolvimento radicular e a dinâmica da MOS.

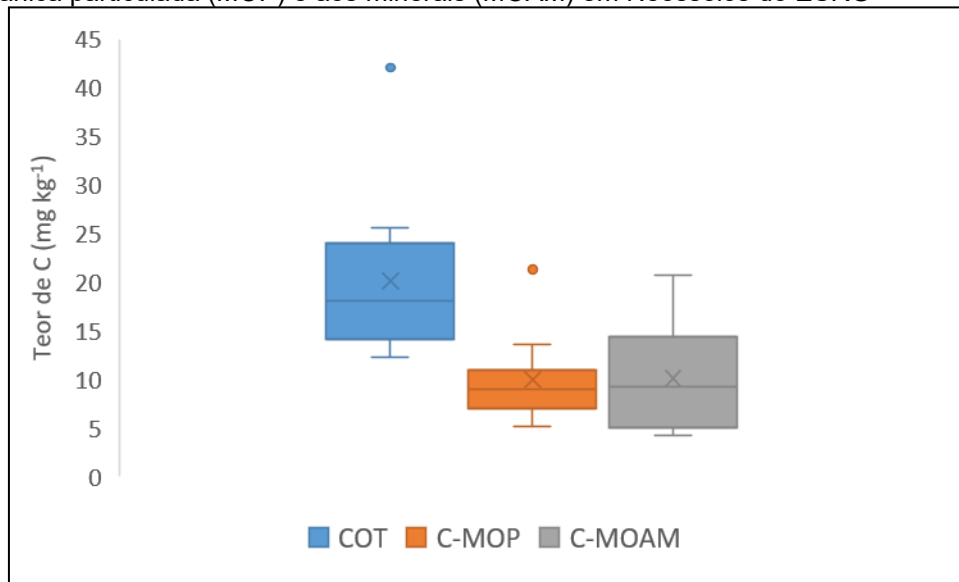
3.3.1. Teores de carbono orgânico no solo

Os diagramas de *boxplot* (Figura 3.2) evidenciaram a presença de valores discrepantes, acima do limite superior de COT e C-MOP, indicando resultados inusitadamente altos. Contudo, os teores de COT, MOP e MOAM não apresentaram diferenças estatísticas ($p > 0,05$) entre as duas classes de Neossolos (Tabela 3.4).

Os teores de COT apresentaram ampla variação entre classes e os usos predominantes com teores entre 12,31 g kg^{-1} (P9), em área de mata nativa até 42,05 g kg^{-1} , em área de lavoura de milho com resteva de azevém (P2). Na fração MOP o teor

de carbono variou entre 6,98 g kg⁻¹ (P5) e 21,30 g kg⁻¹ (P2) e, na fração MOAM, a variação foi de 4,21 g kg⁻¹ (P9) a 20,75 g kg⁻¹ (P2).

Figura 3.2 – Diagrama de *boxplot* dos teores de carbono orgânico total (COT), carbono associado à matéria orgânica particulada (MOP) e aos minerais (MOAM) em Neossolos do ESRG



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 3.4 – Teores de COT (g kg⁻¹), MOP (g kg⁻¹), MOAM (g kg⁻¹) em perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG

Classe	Perfil	Uso do Solo	COT	MOP	MOAM	MOP:MOAM
RL	P1	Campo sujo	17,98	13,61	4,37	3,12
	P2	Lavoura/resteva	42,05	21,30	20,75	1,03
	P6	Lavoura/Pomar	14,12	7,64	6,47	1,18
	P7	Pomar	19,30	6,50	12,80	0,51
	P10	Pomar	24,07	9,72	14,35	0,68
	P11	Campo nativo	25,59	10,97	14,62	0,75
RR	P3	Lavoura/Pomar	14,09	8,99	5,10	1,76
	P4	Lavoura/Pomar	20,03	10,81	9,22	1,17
	P5	Lavoura/Pomar	18,04	6,98	11,06	0,63
	P8	Mata nativa	25,21	10,53	14,68	0,72
	P9	Mata nativa	12,31	8,09	4,21	1,92

Fonte: elaborado pelo autor

Os Neossolos Litólicos (RL) apresentaram maior teor médio de COT (23,85 g kg⁻¹, ±9,84 g kg⁻¹) em comparação aos RR (17,94 g kg⁻¹; ±5,09 g kg⁻¹). Observou-se maior amplitude de variação entre as frações lábil (MOP) e estabilizada (MOAM), com valores

de MOP variando de 6,50 a 21,30 g kg⁻¹ e de MOAM entre 4,37 e 20,75 g kg⁻¹. Em áreas de campo (P1 e P11), os teores de COT nos RL, foram de 17,98 e 25,59 g kg⁻¹, com predominância de MOP em P1 (76%) e de MOAM em P11 (57%). Na lavoura (P2), registrou-se o maior COT (42,05 g kg⁻¹), com equilíbrio entre MOP e MOAM (≈50%). Em áreas de lavoura/pomar (P6), os teores de COT foram menores (14,12 g kg⁻¹), mas próximos ao equilíbrio entre frações (MOP = 54%). Em pomares (P7 e P10), os teores de COT foram elevados (≈20–24 g kg⁻¹), com predominância de MOAM (60–66%).

Os Neossolos Regolíticos (RR) exibiram menor teor médio de COT (17,94 g kg⁻¹, ± 5,09 g kg⁻¹) e menor variabilidade entre frações. Os valores de MOP variaram de 6,98 a 10,81 g kg⁻¹ e os de MOAM de 4,21 a 14,68 g kg⁻¹. Áreas agrícolas (P3, P4 e P5) oscilaram entre predominância de MOP e MOAM, enquanto matas nativas (P8 e P9) mostraram contraste entre estabilização em P8 e aporte lábil em P9. Em áreas agrícolas (P3 e P5), os teores de COT foram de 14,09 e 20,03 g kg⁻¹, com predominância de MOP em P3 (64%), equilíbrio em P4 (54%) e maior estabilização mineral em P5 (61%). Nas matas nativas (P8 e P9), observou-se contraste marcante: P8 apresentou COT elevado (25,21 g kg⁻¹) e predominância de MOAM (58%), enquanto P9 registrou o menor COT (12,31 g kg⁻¹) e predominância de MOP (66%).

A razão MOP:MOAM variou amplamente entre os perfis, refletindo diferentes dinâmicas de aporte e estabilização da matéria orgânica. Valores elevados (>1,5) foram observados em P1, P3 e P9, indicando maior aporte recente de carbono lábil e menor estabilização mineral. Valores intermediários (~1,0–1,2) ocorreram em lavouras/pomares (P2, P4, P6), sugerindo equilíbrio entre MOP e MOAM. Valores baixos (<0,8) foram registrados em pomares (P7, P10), campo nativo (P11), lavoura/pomar (P5) e mata nativa (P8), indicando maior predominância de MOAM e maior estabilização da MOS.

Nas áreas de pomares, teores elevados de COT de 19,30 g kg⁻¹ (P7) e 24,07 g kg⁻¹ (P10), com predominância de MOAM, (66% e 60%, respectivamente), evidenciam que o não revolvimento do solo e a presença de plantas de cobertura favorecem a estabilização mineral. Nas áreas cultivadas com lavouras nas entrelinhas de pomares o COT foi de ≈ 14,00 g kg⁻¹ em P3 e P6 a 18,04 g kg⁻¹ (P5) e 20,03 g kg⁻¹ (P4), com P6 e

P4 próximas do equilíbrio (MOP = 54%), predomínio de MOP em P3 (64%) e maior estabilização mineral em P5 (61%), sugerindo diferenças no aporte e na estabilização conforme o manejo.

A razão MOP:MOAM oferece uma boa estimativa do nível de proteção de MOAM. Ou seja, quanto maior for essa relação, com elevados teores de MOP mais protegido estaria o MOAM do ataque por microrganismos. Os perfis P1 (3,12), P9 (1,92) e P3 (1,76) apresentaram as relações MOP: MOAM mais elevadas ($>1,5$), indicando solos com maior aporte recente de matéria orgânica, mas menor estabilização. São ambientes mais dinâmicos, com teores de carbono ainda pouco protegidos. Relações MOP:MOAM intermediárias (1,0 – 1,2), registradas em ambientes de lavoura/pomar, em P2 (1,03), P6 (1,18) e P4 (1,17) mostram equilíbrio entre MOP e MOAM. Pode-se observar que quanto mais elevado o teor de COT, maior a fração de MOAM, sugerindo transição entre carbono lábil e estabilizado. Em baixas relações MOP:MOAM ($<0,8$), como registrado nos pomares P7 (0,51) e P10 (0,68), em campo nativo P11 (0,75), P5 em lavoura/pomar (0,63), e em mata nativa P8 (0,72), o predomínio de MOAM acompanha proporcionalmente o aumento de COT. Isto evidencia que a proteção da matéria orgânica depende do aporte constante de resíduos orgânicos e de ambientes com menor grau de perturbação. Ecossistemas como mata nativa (P8), campo nativo (P11) e pomares confirmam a tendência de ecossistemas menos perturbados como propícios à estabilização da MOS.

3.3.2. Índice de Manejo do Carbono

Os resultados do índice de manejo do carbono (IMC), nos Neossolos Litólicos, variaram entre extremos, de 54 em área de pomar (P7) a 310 em área de lavoura (P1), revelando índices superiores aos de mata nativa (P8) utilizada como referência (Tabela 3.5). Os elevados valores de IMC em campo (310) e P2 (lavoura) indicam forte acúmulo de MOP, enquanto os pomares apresentaram os menores índices (54 e 90), sugerindo menor aporte.

Nos Neossolos Regolíticos, os resultados foram mais homogêneos, variando entre 63 e 137, com destaque para a área de mata do P9 (131), que superou a mata nativa de referência. Valores superiores ao de referência, também, foram verificados nas áreas de consórcio lavoura/pomar P3 e P4. A labilidade (L) e o índice de labilidade (IL) mostraram gradiente consistente entre usos, com L e IL menores em áreas de maior estabilidade do solo e maiores em áreas de usos mais intensivos: pomares (IL = 1,17) < mata nativa (IL = 1,41) $\approx$ Campo Nativo (IL = 1,48) < lavoura/pomar (IL = 2,34) < mata em recuperação (3,78) < lavoura/resteva (IL = 4,08). Os resultados do IMC mostram que o campo nativo (P11) e a mata nativa (P8) apresentam valores muito próximos de labilidade e índice de labilidade, sugerindo que ambos ambientes mantêm uma dinâmica semelhante de carbono lábil. No entanto, é importante destacar que o P11 é utilizado para pastoreio, implicando em uma pressão antrópica maior do que na mata. Mesmo sob uso pecuário, o P11 manteve índices comparáveis ao ambiente de referência, indicando que o manejo de pastagem nativa pode conservar parte da qualidade do solo e da estabilidade da MOS. Essa proximidade entre os dois sistemas reforça a ideia de que o P11, apesar de manejado, ainda preserva características funcionais semelhantes às da mata, diferindo dos ambientes de uso mais intensivo, como os pomares, que apresentaram os menores valores de labilidade e IMC.

Tabela 3.5 – Índice de Manejo do Carbono (IMC), Labilidade (L), Índice de Labilidade (IL) e Índice de Estoque de Carbono (IEC) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG, sob diferentes usos

Classe	Perfil	Uso do Solo	L	IL	IEC	IMC
RL	P1	Campo sujo	3,12	4,34	0,71	310
	P2	Lavoura	1,03	1,43	1,67	239
	P6	Lavoura/Pomar	1,18	1,65	0,56	92
	P7	Pomar	0,51	0,71	0,77	54
	P10	Pomar	0,68	0,94	0,95	90
	P11	Campo nativo	0,75	1,05	1,02	106
RR	P3	Lavoura/Pomar	1,76	2,46	0,56	137
	P4	Lavoura/Pomar	1,17	1,63	0,79	130
	P5	Lavoura/Pomar	0,63	0,88	0,72	63
	P8	Mata nativa	0,72	1,00	1,00	100
	P9	Mata nativa	1,92	2,68	0,49	131

Fonte: elaborado pelo autor

3.3.3. Déficit de saturação de carbono no solo

Os índices de saturação de carbono (DSC), apresentados na Tabela 3.6, variaram de 31,38% em área de lavoura (P2) até 85,32%, em área de mata nativa (P9). Os menores déficits de carbono no solo, foram observados em RL (P2 e P11), sugerindo que nestes solos a estabilização do C seria mais efetiva. Mesmo em perfis com elevados teores de C, como P2 (42,05 g kg⁻¹) e P11 (25,59 g kg⁻¹), os baixos índices de DSC, respectivamente 31,38% e 47,21%, sugerem que estes solos ainda poderiam conter maiores estoques de C. Da mesma forma, áreas de pomares em RL (P7 e P10), onde não há revolvimento do solo e plantas de cobertura como nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e aveia preta (*Avena strigosa*) são cultivadas nas entrelinhas, apresentaram índices de DSC relativamente baixos, respectivamente 55,70% e 54,11%.

Tabela 3.6 – Déficit de saturação de carbono (DSC) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG, sob diferentes usos do solo

Classe	Perfil	Uso do Solo	DSC
RL	P1	Campo sujo	0,841
	P2	Lavoura	0,314
	P6	Lavoura/Pomar	0,786
	P7	Pomar	0,557
	P10	Pomar	0,541
	P11	Campo nativo	0,472
RR	P3	Lavoura/Pomar	0,823
	P4	Lavoura/Pomar	0,679
	P5	Lavoura/Pomar	0,589
	P8	Mata nativa	0,538
	P9	Mata nativa	0,853

Fonte: elaborado pelo autor

É importante destacar que, os resultados da Tabela 3.6 devem ser interpretados com cautela, considerando-se as limitações da equação de Six *et al.* (2002). Esta expressão generaliza a capacidade de saturação de carbono a partir da fração mineral fina, sem incorporar particularidades pedogenéticas e mineralógicas dos Neossolos do ESRG. Assim, os valores obtidos não devem ser entendidos como medidas absolutas,

mas como estimativas comparativas do potencial de estabilização da MOS. Em Neossolos Litólicos, rasos e pedregosos, a equação tende a superestimar o potencial, enquanto nos Regolíticos pode subestimá-lo, dada a maior profundidade e presença de horizontes ativos. Estudos recentes (Yu *et al.*, 2017; Guillaume *et al.*, 2022; Georgiou *et al.*, 2025) reforçam que a disponibilidade mineral e o DSC são parâmetros mais robustos para avaliar o potencial de incremento de carbono. Portanto, recomenda-se interpretar os resultados em conjunto com os índices de manejo e labilidade, destacando que usos intensivos, como pomares, reduzem a fração lábil e limitam o preenchimento da capacidade de saturação, enquanto ambiente mais conservados, como campo (P11) e mata nativa (P8), favorecem maior aproximação ao potencial teórico.

3.3.4. Estoques de carbono no solo

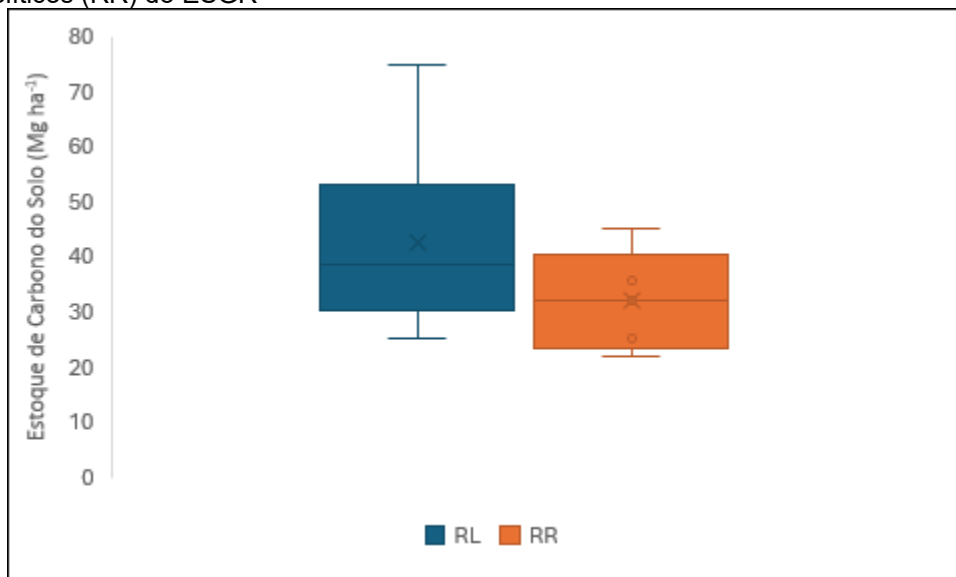
Os estoques de carbono no solo (EC) variaram entre 21,98 Mg ha⁻¹ e 75,08 Mg ha⁻¹, sem diferenças significativas entre as duas classes de Neossolos ($p > 0,05$). Entretanto, foram maiores em RL (42,59 Mg ha⁻¹; $\pm 17,57$ Mg ha⁻¹) que em RR (32,13 Mg ha⁻¹; $\pm 9,29$ Mg ha⁻¹), ainda que RL apresentem profundidades relativamente menores (Figura 3.3).

De forma geral, os EC foram fortemente afetados pela quantidade de fragmentos grosseiros (cascalhos e calhaus) observados nestes solos (Anexo A). Em perfis como o P3 (25,16 Mg ha⁻¹) e P6 (25,21 Mg ha⁻¹) o potencial de estoque foi reduzido devido à alta pedregosidade, 44% e 41%, respectivamente.

Todos os perfis de áreas consorciadas com lavouras de milho e pomares de pêssego atingiram valores entre 25,16 e 35,76 Mg ha⁻¹. O P10 (Pomar) apresentou maiores EC, mesmo em um horizonte superficial relativamente raso (17 cm), semelhantes aos observados em áreas de campo (P11) e mata nativa (P8). O mesmo ocorre na área do perfil P2 (Lavoura), onde a manutenção da palhada de milho e da

resteva de azevém após a colheira sugere que, além de proteger o solo, o aporte constante de matéria orgânica promoveu maiores EC.

Figura 3.3 – Estoques de carbono no solo (Mg ha^{-1}) em horizontes superficiais de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESGR



Fonte: elaborado pelo autor

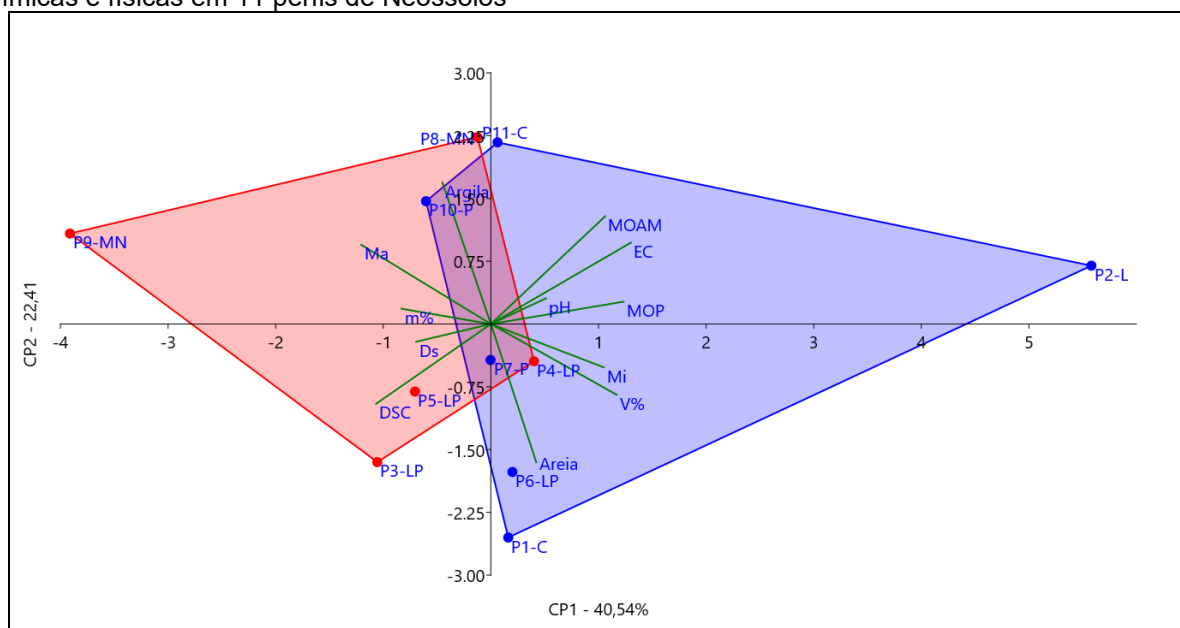
3.3.5. Análise de Componentes Principais

Na análise de componentes principais (ACP) foram selecionadas, pelo critério de Kaiser (autovalor > 1), as três primeiras componentes. Em conjunto, estas componentes explicaram 79,68% da variância total: a CP1 respondeu por 40,54%, a CP2 por 22,41% e a CP3 por 16,73% da variabilidade dos dados (Figura 3.4). A CP1 parece refletir um gradiente que ordena os Neossolos a partir dos teores de carbono e da estrutura porosa do solo, separando os Neossolos Litólicos dos Regolíticos. Esta característica é reforçada pelas posições extremas dos Perfis P9 e P2, que obtiveram o menor e o maior teor de COT.

Na dimensão positiva da CP1 situaram-se, principalmente, perfis RL (P1, P2, P6 e P11) enquanto a maioria dos perfis RR (P3, P4, P5, P8 e P9), ocuparam a dimensão negativa. Na CP1, as maiores cargas fatoriais positivas foram atribuídas a microporosidade (0,31) saturação de bases (0,35) e teores de carbono ($EC = 0,39$,

MOP = 0,39 e MOAM = 0,32). Em contrapartida, cargas negativas foram vinculadas à macroporosidade (-0,36) e ao déficit de saturação do carbono (DSC = -0,32). A CP2 refletiu principalmente a textura do solo, com altas cargas fatoriais positivas para argila (0,50) e negativas para areia (-0,49), refletindo na forte associação com MOAM (0,38), separando solos mais argilosos dos mais arenosos. A CP3 revela a influência positiva do pH (0,59) na qualidade dos solos em oposição à saturação de alumínio (-0,47). Esta componente evidenciou também a importância da densidade do solo (0,44) e da microporosidade (-0,43) na diferenciação destes solos. Os resultados da ACP, de forma geral, indicam que em Neossolos com pH corrigido e maior saturação de bases (V) formam-se ambientes capazes de proporcionar melhores condições para a estabilização e acúmulo de MOS.

Figura 3.4 – Análise de Componentes Principais das associações de MOP e MOAM com variáveis químicas e físicas em 11 perfis de Neossolos



Legenda: Neossolos Litólicos (●); Neossolos Regolíticos (●); estoques de carbono no solo (EC), déficit de saturação de carbono (DSC), pH, saturação de bases (V%), saturação de alumínio (m%), densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e percentuais de areia e argila
C – campo; L – lavoura; LP – lavoura/pomar; MN – mata nativa

Fonte: elaborado pelo autor

3.4. Discussão

Nos Neossolos Litólicos (RL) a área de campo do perfil P1, classificado como campo sujo por Barbosa (2022), apresentou COT ($17,98 \text{ g kg}^{-1}$) com predominância da fração MOP (76%). Esse ambiente reflete o aporte contínuo de resíduos herbáceos e arbustivos, resultando em maior proporção de carbono particulado e menor estabilização mineral (24%). Em P11, área destinada ao pastoreio de gado leiteiro, os teores mais elevados de COT ($25,59 \text{ g kg}^{-1}$) com predomínio da fração MOAM (57%), evidenciam que a diversidade de gramíneas sustenta altos aportes radiculares e boa estabilização. A área de lavoura (P2) apresentou o maior COT ($42,05 \text{ g kg}^{-1}$) e equilíbrio entre MOP e MOAM (49%), evidenciando o efeito positivo da manutenção da palhada e da resteva de azevém. A maior concentração de carbono em P2 refletiu o intenso aporte de biomassa da resteva de azevém (*Lolium multiflorum*), cuja produção de matéria fresca pode atingir cerca de 66 Mg ha^{-1} e matéria seca de 14 Mg ha^{-1} (Kumar *et al.*, 2024). O azevém apresenta elevados teores de matéria orgânica ($\approx 90\%$) (Fluck *et al.*, 2018), o que favorece sua rápida decomposição e incorporação ao solo. Sua relação C/N, geralmente entre 20:1 e 40:1, garante alta produção de massa seca com elevado valor nutricional, especialmente em nitrogênio, promovendo a ciclagem de nutrientes como o potássio. Além disso, o sistema radicular fasciculado e volumoso contribui para a formação de agregados estáveis por meio da exsudação das raízes e da criação de bioporos, melhorando a estrutura física do solo (Carvalho *et al.*, 2022). Já os pomares sobre RL, P7 ($19,30 \text{ g kg}^{-1}$) e P10 ($24,07 \text{ g kg}^{-1}$) apresentaram valores de COT próximos aos da mata nativa enquanto em áreas de lavoura/pomar em RR (P3, P4 e P5) os teores variaram de $14,01$ a $20,03 \text{ g kg}^{-1}$. Este resultado pode ser atribuído ao aporte de resíduos provenientes das podas e da queda de folhas decíduas dos pessegueiros.

Nos Neossolos Regolíticos (RR), os teores de COT foram mais homogêneos, com destaque para P4 ($20,03 \text{ g kg}^{-1}$) e P8 ($25,21 \text{ g kg}^{-1}$). O perfil P8 apresentou, além de altos teores de COT, predominância de MOAM (58%), evidenciando maior estabilização da matéria orgânica e resiliência do estoque de carbono. Já o perfil P9,

embora o teor de COT tenha sido o menor ($12,31 \text{ g kg}^{-1}$), a relação MOP:MOAM (1,92) foi a segunda mais alta, refletindo o predomínio de carbono particulado proveniente da serapilheira arbórea, geralmente mais recalcitrante que as gramíneas (Matos *et al.*, 2023). Essa diferença demonstra como o estágio de desenvolvimento da vegetação influencia diretamente a dinâmica das frações de carbono. Em matas em estágios sucessionais avançados de regeneração natural, o carbono tende a ser estabilizado em MOAM, enquanto em áreas em estágio inicial de recuperação predomina o carbono lábil, caracterizando o papel da sucessão ecológica na transição de carbono lábil para estabilizado. Em solos de florestas maduras, a fração de MOAM pode representar entre 45% e 85% do COT (Gao *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2023), o que se confirma no perfil P8, onde o MOAM foi superior ao MOP. Haddix *et al.* (2020) destacam que a adição de serapilheira resistente aumenta o MOP, enquanto o *pool* de MOAM se forma rapidamente a partir da MOS lábil e apresenta forte resistência à decomposição. Em relação a este aspecto, Venzke (2017) ao estudar os fragmentos florestais da área, registrou que 30% dos indivíduos e espécies são decíduas e semidecíduas. Assim, o equilíbrio entre frações lábeis e recalcitrantes, associado à diversidade de insumos orgânicos, cria um *feedback* positivo para a estabilização da MOS em solos com teores relativamente baixos de carbono ($<3\%$).

De forma geral, os Neossolos Litólicos mostraram maior variabilidade nos teores de carbono, refletindo a influência direta do manejo, enquanto os Regolíticos apresentaram maior uniformidade e tendência à estabilização mineral. As práticas conservacionistas, como a manutenção de resteva, cobertura vegetal e o não revolvimento do solo, favorecem o aumento dos estoques de carbono (Mikha; Marake, 2023), mantendo a ciclagem de nutrientes por meio da rotatividade do MOP e da persistência do MOAM. A comparação entre as frações de MOAM evidencia um gradiente de estabilização: mata e campos em recuperação ($\approx 4,00 \text{ mg kg}^{-1}$) < Lavoura/Pomar ($7,96 \text{ mg kg}^{-1}$) << Pomar ($13,58 \text{ mg kg}^{-1}$) < Mata nativa $\approx$ Campo nativo ($\approx 15,00 \text{ mg kg}^{-1}$). Esse padrão sugere que sistemas com raízes profundas e diversificadas favorecem maior estabilização mineral (MOAM), enquanto sistemas com raízes intermediárias (pomares) mantêm equilíbrio entre carbono lábil e estabilizado. Já

sistemas com raízes anuais e alta produção de biomassa (lavouras e lavoura/pomar) concentram carbono lábil (MOP), exigindo manejo contínuo para promover sua conversão em formas mais estáveis.

3.4.1. Índice de Manejo do Carbono

A fórmula do IMC (Blair *et al.*, 1995) foi concebida para avaliar a qualidade do manejo agrícola a partir da proporção entre carbono lábil e carbono não lábil em relação a um sistema de referência. No entanto, essa abordagem não necessariamente beneficia ambientes com maior aporte de matéria orgânica particulada (MOP), já que o índice é mais sensível à labilidade da MOS do que ao volume absoluto de resíduos adicionados. Assim, sistemas que recebem resíduos recalcitrantes, como folhas decíduas lenhosas ou restos de poda, podem apresentar valores reduzidos de IMC, mesmo com elevado aporte de MOP, enquanto sistemas com resíduos mais lábeis, como resteva de lavouras, tendem a ser favorecidos. Essa limitação metodológica já foi apontada por Vieira *et al.* (2007) e Loss *et al.* (2022), impondo-se a necessidade de interpretar o IMC como um indicador relativo da qualidade da MOS e não como medida direta da quantidade de carbono aportado. No contexto dos Neossolos do ESRG, essa restrição é particularmente relevante, pois a natureza dos resíduos vegetais varia fortemente entre campos nativos, lavouras e pomares, influenciando de forma diferenciada os valores do índice.

A pesar destas limitações, o IMC é um índice robusto para avaliar a qualidade do solo, especialmente quando calculado a partir de fracionamento físico da MOS. Vieira *et al.* (2007) demonstraram a forte correlação entre o IMC e a estabilidade de agregados confirmando que o aporte de carbono lábil, proveniente de resíduos culturais diversificados, é essencial para a formação de agregados e para a proteção física da matéria orgânica.

Nos Neossolos Litólicos (RL), os maiores valores de IMC foram observados em campo nativo (P1 = 310 e P11 = 106) e em lavoura (P2 = 239), confirmando o papel dos

sistemas radiculares densos das gramíneas campestres e do aporte de gramíneas cultivadas na manutenção da qualidade edáfica. Em contrapartida, os pomares (P7 = 54; P10 = 90) apresentaram IMC mais baixo, refletindo menor entrada de carbono lábil, ainda que os resíduos de poda e folhas decíduas contribuam para estoques relevantes de carbono. O perfil P6 (RL – lavoura/pomar) apresentou IMC intermediário (92), sugerindo transição entre carbono lábil e estabilizado.

Nos Neossolos Regolíticos (RR), os valores de IMC foram mais homogêneos, com destaque para mata nativa (P8 = 100; P9 = 131) e para os sistemas consorciados de lavoura/pomar (P3 = 137; P4 = 130). Esses resultados indicam que, embora as matas nativas apresentem predominância de carbono estabilizado (MOAM), os sistemas consorciados podem alcançar IMC elevado quando há diversidade de espécies e aporte contínuo de resíduos. Já o perfil P5 (RR – lavoura/pomar) registrou IMC baixo (63), sugerindo menor eficiência do manejo.

A presença maior de MOP no perfil de mata P9 e lavouras/pomares (P3, P4, P6) está associada ao aporte de resíduos lábeis, enquanto na mata P8 e campo nativo P11 predomina a MOAM, indicando maior estabilização. Esse padrão confirma que o IMC é sensível às práticas de manejo e tende a ser superior em sistemas conservacionistas ou agrícolas com cobertura permanente, pois o aporte contínuo de resíduos culturais aumenta a fração lábil e sustenta a ciclagem de nutrientes (Loss *et al.*, 2011). Em estudo comparando o IMC e o IL em sistemas de plantio direto e convencionais, Conceição *et al.* (2014) encontraram índices de labilidade em plantio direto, superiores aos observados em campo nativo, utilizado como referência. O IMC em plantio direto foi superior (115% e 139%) ao de campo nativo.

Em sistemas de manejo conservacionista, o não revolvimento do solo e a manutenção dos resíduos culturais, contribuem para preservar a estabilidade e aprimorar a qualidade do ambiente edáfico, tornando-o mais próximo dos ecossistemas naturais. Assim, os resultados demonstram que tanto os sistemas naturais (campo e mata nativa) quanto os agrícolas bem manejados (lavoura/resteva, lavoura/pomar consorciados) podem manter altos valores de IMC, aproximando-se em qualidade edáfica. Entretanto, convém destacar que os menores valores de IMC e IL obtidos por

pomares em RL, sugerem que o grande aporte de material de podas, mais rico em lignina, reduz o aporte de carbono lábil, limitando a sensibilidade desses indicadores. Esse resultado reforça as conclusões de Angers *et al.* (2011) e Di *et al.* (2017), que destacam o DSC como indicador mais robusto, onde sistemas intensivos mantêm maior déficit, enquanto ambientes conservados (mata nativa) e usos conservacionistas (campo nativo e alguns pomares) aproximam-se mais do potencial teórico.

3.4.2. Déficit de saturação de carbono no solo

Os resultados do DSC evidenciaram contrastes entre os usos e as classes de Neossolos. Nos RL, campos nativos (P11) e lavouras com resteva (P2) apresentam valores baixos, próximos ao limite de saturação mineral, 47,21% e 31,38%, respectivamente, sugerindo maior estabilidade da MOS, mas menor potencial de acúmulo adicional. Da mesma forma, áreas de pomares em RL (P7 e P10), onde não há revolvimento do solo e plantas de cobertura como nabo forrageiro e aveia preta são cultivadas nas entrelinhas, apresentaram índices de DSC relativamente baixos. Nos RR, pomares recém implantados (P3, P4 e P5) apresentam DSC mais elevado, indicando maior capacidade de sequestro futuro. Esses resultados convergem com os achados por Yin *et al.* (2022), que verificaram que o DSC é menor em sistemas de plantio direto com retenção de resíduos do que em sistemas de preparo convencional sem resíduos, indicando que sistemas conservacionistas aproximam o solo da saturação de carbono. Além disso, Yin *et al.*, 2022 em consonância com Tao *et al.* (2022) revelam que valores baixos de DSC reduzem a abundância e diversidade de microrganismos fixadores de carbono, enquanto valores mais altos ampliam a diversidade funcional e o potencial de acúmulo.

No contexto dos Neossolos do ESRG, o uso agrícola intensivo, aumenta o déficit e reduz a labilidade, mesmo após alguns anos em pousio (P1). Em contrapartida, sistemas conservacionistas, como campo nativo (P11) e matas nativas preservadas (P8), aproximam-se mais da saturação teórica, favorecendo tanto o sequestro de

carbono quanto comunidades microbianas funcionais. O fato dos Neossolos avaliados estarem longe da completa saturação, aponta para possibilidades de ampliar e intensificar as práticas de manejo que contribuem para o aumento dos estoques de carbono no solo. Na visão de Angers *et al.*, (2011) e de Di *et al.* (2017), o DSC é um indicador robusto para avaliar o potencial de incremento de carbono em diferentes manejos, sendo elevado em sistemas intensivos e reduzido em práticas conservacionistas. Assim, o DSC por integrar aspectos químicos e biológicos é um essencial para avaliar tanto a persistência quanto a resiliência dos estoques de carbono em diferentes sistemas de uso.

3.4.3. Estoques de carbono no solo

De forma geral, os EC foram fortemente afetados pela quantidade de fragmentos grosseiros (cascalhos e calhaus) observados nestes solos. O percentual de fragmentos grosseiros foi em média 29% nos RL e 25% nos RR (desvio padrão $\pm 10\%$ em ambos), variando de 15% em área campo (P11 – RL) a 44% (P3 – RR). Os resultados evidenciam que os Neossolos Litólicos, mesmo sendo solos mais rasos e pedregosos, apresentaram, em média, estoques de carbono ($42,58 \text{ Mg ha}^{-1}$) superiores aos Regolíticos ($32,13 \text{ Mg ha}^{-1}$), ainda que não significativos ($p > 0,05$). Este resultado reveste-se de importância dado que RL são solos relativamente mais frágeis que RR, em função da menor espessura do horizonte superficial e por apresentarem maior pedregosidade (Dalmolin, Pedron e Flores, 2019).

As áreas de campo nativo (P11) e mata nativa (P8) confirmaram a importância da biomassa radicular e da vegetação arbórea na sustentação dos estoques ($EC \approx 45,00 \text{ Mg ha}^{-1}$). A alta diversidade de gramíneas e herbáceas em áreas de formação campestre do bioma Pampa (Andrade *et al.*, 2023) proporciona um grande volume de biomassa radicular. A entrada de carbono por raízes vivas via rizodepósitos é mais eficiente do que a entrada de restos de parte aérea e raízes, formando reservatórios de carbono orgânico do solo de ciclo lento, associado a minerais (Gregory, 2022). Os

aportes de raízes vivas constituem a principal via de formação da MOS, podendo ser de duas a 13 vezes mais eficientemente incorporadas, superando em importância os resíduos de raízes mortas ou da parte aérea (Sokol *et al.*, 2019).

O perfil P2 (lavoura/resteva), em Neossolo Regolítico, destacou-se com o maior EC ($75,08 \text{ Mg ha}^{-1}$), onde a manutenção da palhada de milho e da resteva de azevém após a colheita além de proteger o solo, indica que o aporte constante de matéria orgânica promove maiores EC. do aporte contínuo de palhada e raízes de gramíneas. Em pomares (P10 e P7), o não revolvimento e o uso de plantas de cobertura mantiveram EC próximos aos ambientes naturais. O pomar P10 alcançou elevado EC ($42,97 \text{ Mg ha}^{-1}$), mesmo em um horizonte superficial relativamente raso (17 cm), semelhantes aos observados em áreas de campo e mata nativa. O mesmo ocorre na área do perfil P2 (Lavoura). Estes resultados sugerem que o uso e manejo destas áreas têm conseguido manter os EC em níveis adequados e próximos ao observado em ambientes naturais conservados.

Todos os perfis de áreas com lavouras de milho e pomares de pêssgo (P3, P4, P5 e P6) atingiram valores entre $25,16$ e $35,76 \text{ Mg ha}^{-1}$. Perfis como o P3 e P6 tiveram seu potencial de estoque reduzido, 44% e 41%, respectivamente devido à alta pedregosidade (Fenton *et al.*, 2024). A alta quantidade de fragmentos grosseiros (37%) e a reduzida profundidade do horizonte superficial, na área de campo (P1) limitaram os EC, entretanto, o manejo com resteva sustentou estoques relevantes ($32,10 \text{ Mg ha}^{-1}$). O resultado observado em P1 é consistente com o referido por Bispo *et al.* (2023) que relatam grandes perdas de C (cerca de $33 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) devido ao pastoreio intensivo. Apesar das limitações físicas, os EC destas áreas foram superiores aos observados em área de mata nativa (P9), que registrou o menor EC ($21,98 \text{ Mg ha}^{-1}$), refletindo o estágio inicial de sucessão e menor aporte de raízes e resíduos. Esses resultados reforçam que o manejo conservacionista em RL pode compensar limitações físicas e manter estoques de carbono comparáveis aos ambientes naturais, enquanto em RR o potencial de incremento depende da recuperação da vegetação e da redução da pedregosidade.

3.4.4. Análise de Componente Principais

A Ds variou de 1,12 (P8) a 1,58 (P10) com média de 1,34 Mg m⁻³ e 1,32 Mg m⁻³, em RL e RR, respectivamente. Valores de Ds muito elevados podem atingir limites críticos que comprometem a capacidade do solo em desempenhar suas funções. Contudo, mesmo a maior Ds (1,58 Mg m⁻³), observada em área de pomar, foi inferior a densidade crítica, estabelecida por Reichert *et al.* (2003), para solos franco arenosos (1,7 a 1,8 Mg m⁻³). A Ds tem impactos diretos na estrutura do solo e seus resultados refletiram-se na porosidade, dada a correlação muito forte e altamente significativa, entre estas variáveis ($r = -0,8528$, $p = 0,0008$). Entretanto, a macroporosidade verificada em RL foi significativamente menor ($p = 0,047$) que nos RR. A microporosidade apresentou comportamento inverso, maior em RL e menor em RR. A magnitude dos efeitos para a macroporosidade foi moderada ($\omega^2=29,55$; ICC=45,82), conferindo suficiente segurança estatística.

A menor proporção de macroporos e maior volume de microporos favorece a retenção de água em RL. Em RR, ao contrário, a lixiviação é favorecida pelo maior volume de macroporos, que também reduz o armazenamento de água na camada superficial do solo. Em estudo realizado para avaliar a água disponível (AD) nos Neossolos desta mesma área, Barbosa (2022) avaliou perfis de RL ($n = 4$) e RR ($n = 3$). O volume de AD na camada superficial variou, em RL, de 0,21 a 0,31 m³ m⁻³ enquanto que, em RR, a variação foi de 0,17 a 0,18 m³ m⁻³. Em RR, maiores volumes de AD foram registrados em horizontes saprolíticos (Barbosa, 2022). O menor armazenamento de AD na camada superficial e maior em horizontes subsuperficiais em RR, também, foi observado por Pedron *et al.* (2011) e Almeida *et al.* (2015).

As diferenças significativas verificadas na porosidade de RL e RR condicionaram um ambiente edáfico propício a variações químicas, com impactos na fertilidade e estabilidade da MOS destas classes de Neossolos. Isto porque a estrutura dos poros determina se os nutrientes aplicados serão aproveitados pelas culturas ou lixiviados para camadas mais profundas do solo. Pedologicamente, a maior microporosidade em RL, embora não significativa (Kruskal-Wallis $p = 0,0654$), sugere uma estrutura capaz

de reter umidade por mais tempo, o que pode ser um fator compensatório à sua menor profundidade efetiva. O solo retém a umidade principalmente com base na textura, embora a água disponível para as plantas possa ser modificada pelo teor de MOS devido à forma como as partículas do solo se agregam (Horel *et al.*, 2015). O aumento da microporosidade em RL sugere que o incremento de matéria orgânica estaria promovendo uma melhor estruturação dos microagregados,

Na ACP, a forte contribuição da saturação de bases (V%) na CP1 reflete as práticas de calagem, comum nas áreas avaliadas, para correção da acidez natural dos Neossolos do ESRG. Os teores de Ca (Tabela 3.2), foram relativamente superiores em RL. Estes resultados, também, refletiram-se na CTC, significativamente, maior em RL. A prática da calagem além de reduzir a acidez do solo e aumentar a disponibilidade de Ca e Mg, reduz o efeito fitotóxico do Al, favorecendo o crescimento radicular das plantas e a absorção de água, aumentando a produtividade agrícola (Vieira; Viero, 2025). Por estimular sistemas radiculares mais extensos, a calagem ainda favorece melhor aproveitamento de água e nutrientes existentes no solo (Van Raij, 2017). Em concentrações não muito elevadas o Ca, aumenta a absorção de micronutrientes (Lourenzi *et al.*, 2025) e, conseqüentemente, a fertilidade e produtividade destes solos.

Esses resultados evidenciam uma maior capacidade dos RL em armazenar e disponibilizar nutrientes, ainda que em horizontes superficiais menores em relação aos RR. A maior CEC quando associada a solos com elevada MOS ajuda a reter e proteger compostos orgânicos. Estas condições também foram constatadas por Burgueño *et al.* (2024) que obtiveram uma correlação positiva e significativa ($r = 0,7323$) entre o COT e a SB, com teores superiores observados em RL. Esta diferença seria condicionada pela maior microporosidade e pela impermeabilização que o contato lítico, em menores profundidades, estabelece nos RL. Dessa forma, os RL perderiam menos nutrientes por lixiviação em relação aos RR, promovendo uma maior estabilidade da MOS.

Em solos de textura franco-arenosa, espera-se que maiores teores de argila apresentem maiores teores de MOS, entretanto ainda que com forte carga fatorial (0,50) o teor de argila foi alocado na CP2, que contribuiu com 22,41% da variância dos dados. Os resultados sugerem que nestes solos a proteção física em microagregados é

um fator mais relevante para a proteção do C. A calagem ao corrigir a acidez, aumenta a saturação por bases e pode melhorar a estrutura do solo indiretamente, favorecendo a agregação. Além de melhorar a estrutura do solo, desempenha um papel fundamental na estabilização da MOS, sendo um dos principais mecanismos da persistência dos estoques de C no solo a longo prazo. O Ca estabelece conexões entre as superfícies carregadas negativamente das argilas e as moléculas de MOS, criando complexos organominerais que protegem a MOS da decomposição microbiana.

O manejo de Neossolos Litólicos e Regolíticos do ESRG com práticas agrícolas conservacionistas, como o uso de plantas de cobertura e o revolvimento mínimo do solo, é crucial para melhorar a qualidade destes agroecossistemas. Os resultados confirmam que sistemas com raízes profundas e diversificadas (matas e campos) apresentam maior estabilização mineral e estoques próximos ao limite de saturação. Pomares, com raízes intermediárias e aporte de resíduos culturais, mantêm estoques relevantes, mas com menor labilidade. Já lavouras e sistemas consorciados com pomares concentram carbono lábil e exibem maior IMC, mas dependem de práticas conservacionistas para converter esse carbono em formas mais estáveis. Assim, destaca-se que a diversidade dos sistemas radiculares é determinante na qualidade e persistência da matéria orgânica do solo.

3.5. Conclusões

Os estoques de carbono orgânico total não diferem estatisticamente entre os diferentes usos do solo em Neossolos Litólicos e Regolíticos, demonstrando que a matriz mineral comum exerce papel preponderante na estabilização da matéria orgânica. Contudo, nos compartimentos de carbono a MOS é fortemente condicionada pelo tipo de cobertura vegetal e pelo sistema radicular predominante de cada sistema produtivo.

A estabilidade do carbono nos Neossolos é fortemente influenciada pelo tipo de uso e pelo sistema radicular predominante. Ambientes mais preservados como campos

nativos sob pastoreio e matas nativas, com raízes profundas e diversificadas, bem como as áreas de pomares sob manejo conservacionista, direcionam o carbono para a fração associada aos minerais (C-MOAM), promovendo maior estabilização da matéria orgânica a longo prazo. Os sistemas agrícolas com culturas anuais ou consorciadas concentram o carbono na fração particulada (C-MOP), evidenciando ambientes mais dinâmicos e dependentes de aportes contínuos de biomassa para a manutenção de seus estoques.

A estabilização do carbono nos Neossolos é condicionada por três fatores principais: a fertilidade química (mediada pelo pH e saturação por bases via calagem); a textura do solo e a estrutura física (expressa pela densidade e porosidade do solo). A interação desses atributos explica a variabilidade observada nos compartimentos de carbono (MOP, MOAM e estoques totais), evidenciando que práticas de manejo como calagem, manutenção de resíduos culturais e uso de plantas de cobertura, são fundamentais para promover a estabilização da matéria orgânica. Dessa forma, sistemas agrícolas bem manejados podem se aproximar das condições de ambientes naturais, conciliando produtividade e sustentabilidade.

4. Capítulo 2 – A porosidade como controle primário da persistência da matéria orgânica em Neossolos Litólicos e Regolíticos: evidências isotópicas e espectroscópicas

4.1. Introdução

A compreensão dos mecanismos que regem a dinâmica do carbono no solo passou por uma profunda mudança de paradigma desde o final do século XX. O modelo clássico da “humificação” (Camargo; Santos; Guerra, 1999; Novotny; Martin-Neto, 1999) postulava que a formação da matéria orgânica do solo (MOS) ocorria pela síntese biótica ou abiótica de macromoléculas complexas denominadas substâncias húmicas. Nesse contexto, sua permanência no solo era explicada pela estabilidade química intrínseca, atribuída à recalcitrância dessas macromoléculas.

O paradigma contemporâneo da dinâmica do carbono no solo enfatiza que a estabilidade e a persistência da matéria orgânica do solo (MOS) resulta da ação integrada da associação com minerais reativos (Kleber *et al.*, 2007; Lehmann; Kleber, 2015; Six *et al.*, 2002), proteção física em agregados e poros (Bhattacharyya *et al.*, 2021; Hartmann; Six, 2023;) e acessibilidade microbiana aos substratos orgânicos (Erktan; Or; Scheu, 2020). Nessa perspectiva, a atividade e a eficiência da microbiota atuam como motores da formação de MOS persistente, convertendo compostos lábeis em necromassa microbiana que se liga fortemente à matriz mineral (Cotrufo *et al.*, 2013; Kallenbach *et al.*, 2016; Sokol *et al.*, 2022). Assim, a MOS é concebida como um *continuum* de compostos orgânicos em constante transformação, cuja estabilidade depende mais das interações ecológicas e físico-químicas no solo do que de qualquer resistência molecular intrínseca dos compostos orgânicos.

O entendimento sobre a estabilidade e a persistência do carbono no solo é mais bem compreendido quando a MOS é compartimentada em dois reservatórios funcionais distintos: a matéria orgânica particulada (MOP) e a matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) (Lavallee; Soong; Cotrufo, 2019). Enquanto a MOP é composta predominantemente por resíduos vegetais estruturais e lignificados, cuja estabilidade depende sobretudo da oclusão física em agregados e de sua resistência química relativa, a MOAM é formada pela estabilização preferencial de compostos lábeis transformados em necromassa microbiana (Cotrufo *et al.*, 2015). Essas interações da MOS com a matriz mineral exercem o controle final sobre a proteção do carbono a longo prazo, garantindo sua estabilização em escalas de tempo de décadas a milênios (Cotrufo *et al.*, 2013). Diante disso, compreender a distribuição da MOS entre essas duas frações permite direcionar o manejo agrícola para estratégias de sequestro de carbono mais eficientes e duradouras (Cotrufo *et al.*, 2019).

Neste contexto, a análise espectroscópica do infravermelho médio vem sendo utilizada há muito tempo para investigar a natureza da MOS (Aguilar *et al.* 2021; Borisover, Lado, Levy, 2025; Freixo *et al.*, 2003; Haberhauer *et al.*, 1998; Hayes; Swift, 2018), permitindo mapear a abundância relativa de grupos funcionais específicos. A espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR) pode ser usada para descrever a composição da MOS por meio de seus diversos grupos funcionais (aromáticos, alifáticos, fenólicos, hidroxílicos, carboxílicos e polissacarídicos) (Fultz *et al.*, 2014; Kaiser *et al.*, 2007; Tinti *et al.*, 2015). Para melhor compreensão de como interagem esses grupos funcionais na qualidade da MOS, o uso de indicadores estruturais derivados do FTIR, como os índices de aromaticidade (IAr) e de hidrofobicidade (InH), oferecem uma assinatura digital sobre o nível de estabilização do carbono (Dick *et al.*, 2008; Dick, Santos, Ferrari, 2002; Pärnpuu *et al.* 2022;) e permitem decifrar mecanismos da persistência do carbono orgânico no solo. Os dados de FTIR podem servir como indicadores para distinguir horizontes do solo (Calderón *et al.*, 2011; Nuzzo *et al.*, 2020;) e revelar a gênese e a composição do material vegetacional original (Artz *et al.*, 2008; Haberhauer *et al.*; 2000; Heller *et al.*, 2015). O Uso de análises espectroscópicas permitiu a Dudek *et al.* (2022) estabelecer uma associação confiável

entre amostras de solos enterrados e pastagens/bosques com episódios de uso de terra arável, seguidos pela vegetação florestal predominante após o enterramento.

Em complemento às análises espectrográficas por FTIR, os isótopos estáveis de carbono e nitrogênio oferecem uma perspectiva essencial para compreender a acumulação e a dinâmica da MOS ao longo dos perfis de solo (Accoe *et al.*, 2002). A assinatura isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ reflete diretamente a vegetação dominante, distinguindo plantas C_3 (-20 a -37‰) de plantas C_4 (-10 a -16‰) (Visser *et al.*, 2026). Em complemento, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ revelam processos de mineralização e estabilização organomineral (Gurmesa *et al.*, 2021). As assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em frações específicas da MOS podem revelar os processos de associação organomineral e, conseqüentemente, os caminhos de estabilização do carbono no solo. Estudos demonstram que diferentes usos do solo modulam esses sinais. Kayler *et al.* (2011) verificaram que os solos florestais continham, em média, 10% mais carbono estabilizado em relação ao estoque total do que os solos agrícolas, demonstrando que diferentes mecanismos predominam em cada tipo de uso do solo. A transformação de ecossistemas florestais em áreas agrícolas avaliada por Diochon e Kellman, (2008) intensificou a mineralização do carbono em profundidade, promovendo perdas significativas de estoques que antes eram considerados relativamente estáveis. Essa intensificação se refletiu em perfis de $\delta^{13}\text{C}$ mais enriquecidos, em contraste com solos não perturbados, nos quais o enriquecimento foi mais moderado. Razanamahandry *et al.* (2022) demonstraram, que a conversão de florestas em pastagens deixa marcas persistentes na MOS, evidenciadas pelo declínio sistemático de $\delta^{13}\text{C}$ em profundidade e pela predominância de carbono antigo de origem florestal. De forma abrangente, Krüger, Finn e Don (2024) sintetizaram centenas de perfis globais, confirmando que os maiores gradientes isotópicos (>10‰) ocorrem em transições entre vegetação C_3 e C_4 , enquanto em ecossistemas estáveis o aumento típico é de apenas 1 – 3‰ do horizonte superficial ao subsolo.

Nesse contexto, os Neossolos representam um estágio pedogenético inicial particularmente relevante para estudos isotópicos, pois seus gradientes de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ são menos intensos do que em solos mais desenvolvidos (Skadell *et al.*, 2025), mas já

revelam a interação entre fontes recentes e antigas de carbono e nitrogênio. A distinção entre Neossolos Litólicos e Regolíticos fornece subsídios para compreender como alterações ambientais e antrópicas interferem na evolução dos ecossistemas. Nos RL, a menor profundidade e o predomínio de microporos atuam na proteção física e estabilização da MOS na camada superficial, permitindo registrar por meio de alterações estruturais e enriquecimento isotópico (quando sob rotação com gramíneas C₄) os impactos diretos do manejo e uso agrícola recente. Nos RR, a maior profundidade e macroporosidade, facilitam a migração do carbono, permitindo conservar MOP em horizontes mais profundos e preservar assinaturas isotópicas antigas, funcionando como arquivos paleoambientais da vegetação ancestral. Assim, o estudo desses solos evidencia de forma direta a influência da vegetação atual e das mudanças recentes na cobertura sobre a assinatura isotópica, oferecendo uma oportunidade única de compreender os mecanismos iniciais de decomposição, estabilização mineral e reciclagem microbiana que, em solos mais desenvolvidos, se acumulam como registros paleoambientais de longa duração.

Os estudos comparativos sobre os efeitos da vegetação e do uso da terra na composição da MOS em Neossolos ainda são escassos. Na região leste do ESRG, onde predominam Neossolos Litólicos e Regolíticos desenvolvidos sobre rochas graníti/cas e gnáissicas, inexistem investigações dessa natureza. A distribuição e o grau de evolução desses solos no extremo sul do Brasil estão intimamente relacionados à dinâmica paleovegetacional e às oscilações climáticas do Quaternário Tardio. Durante o Último Máximo Glacial e o início do Holoceno, o clima mais frio e seco favoreceu a hegemonia de estepes e savanas campestres (Behling, 2002; Pillar, 2003). Nessas condições de restrição hídrica e baixa atividade arbórea, o intemperismo químico foi limitado, sugerindo que os Neossolos Litólicos sob pastagens naturais representam heranças pedológicas desse período seco, preservando superfícies pouco evoluídas e rasas na paisagem. Em contraste, a transição para um clima mais úmido no Holoceno Médio e Tardio promoveu a expansão das formações florestais sobre a matriz campestre ancestral (Behling; Pillar; Bauermann, 2009). Essa mudança biótica introduziu novos fatores pedogenéticos, como sistemas radiculares mais profundos e

maior aporte diferenciado de resíduos florestais, aceleraram as taxas de alteração mineral e a diferenciação de horizontes. Assim, os Neossolos Regolíticos refletem uma evolução pedológica ativa e contemporânea, moldada pelo avanço florestal sobre os campos do Pampa.

Compreender a tensão entre solos relictos e solos em evolução ativa é essencial para avaliar como o manejo antrópico atual impacta a resiliência dos estoques de carbono orgânico diante das transformações históricas do bioma. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi investigar se Neossolos Litólicos e Regolíticos diferem em estrutura física e composição isotópica e espectroscópica da MOS, e se estas diferenças têm efeito na estabilização do carbono e em suas trajetórias pedogenéticas. Nossa hipótese é que Neossolos Regolíticos apresentam maior proporção de macroporos, enquanto Neossolos Litólicos são caracterizados por maior microporosidade; adicionalmente, espera-se que tais contrastes estruturais se traduzam em padrões espectrais distintos da MOS.

4.2. Material e métodos

A área de estudo está situada na localidade do Quilombo, sétimo distrito de Pelotas, RS (Figura 4.1). A região contempla uma grande complexidade geológica característica da província geomorfológica do Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG). O substrato geológico pertence à Suíte Pinheiro Machado formada, principalmente, por granitos e gnaisses (Philipp *et al.*, 2002), o que congrega elevada complexidade pedológica. O relevo local varia de plano à forte ondulado, com predomínio de relevo ondulado na maior parte da área, transicionando para forte ondulado em áreas de mata nativa.

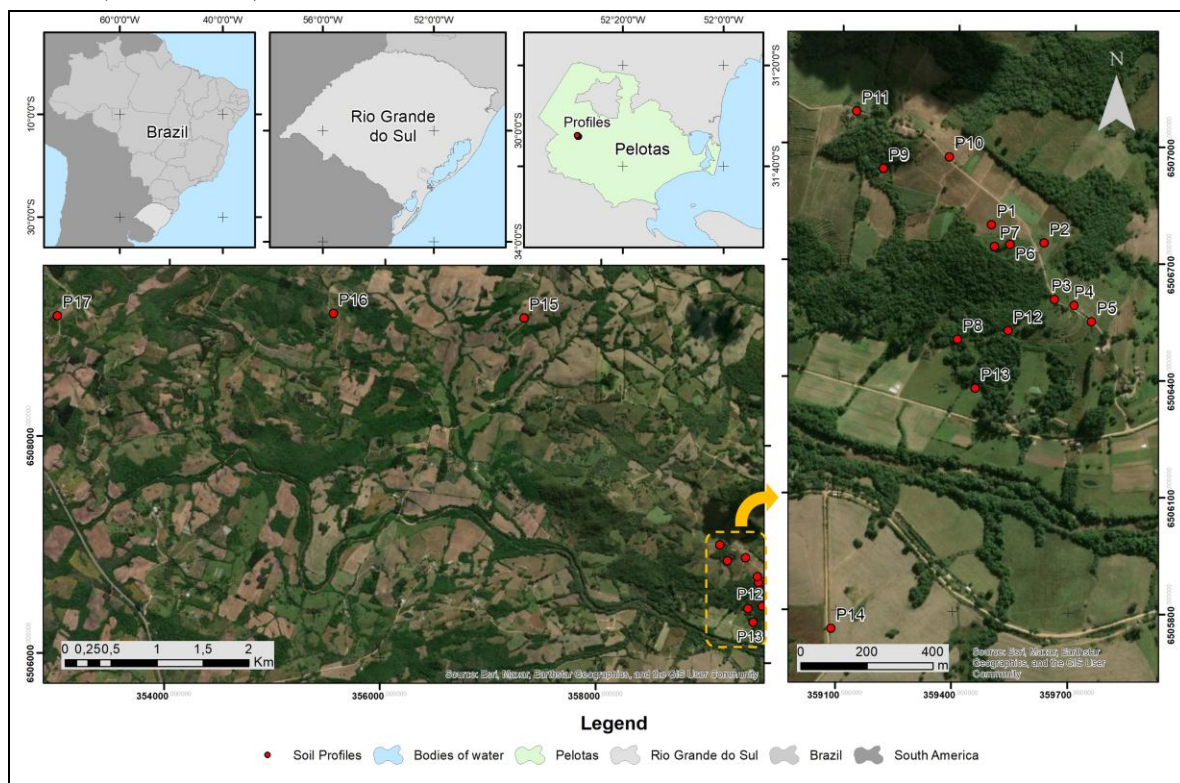
As áreas avaliadas situam-se em propriedades rurais com sistema de produção de base agrícola familiar. O uso do solo é dedicado ao cultivo de pomares de pêssego intercalado com lavouras anuais (principalmente de milho), campos nativos dedicados à

pecuária leiteira e fragmentos de floresta estacional semidecidual. A caracterização da área de cada perfil e o histórico de manejo adotado estão descritos no Apêndice A.

4.2.1. Amostragem do solo

As amostras de solo são provenientes de 17 perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos (RL $n = 7$; RR $n = 10$). De cada perfil foram retiradas amostras simples e representativas de cada horizonte pedológico identificado e realizadas análises químicas e físicas de rotina.

Figura 4.1 – Mapa de localização dos 17 perfis de Neossolos, na região leste do Escudo Sul-Rio-Grandense, em Pelotas, RS



Fonte: elaborado pelo autor

4.2.2. Análises físicas

A granulometria foi determinada em relação à massa total da amostra seca coletada no campo. A classificação foi realizada por peneiramento seco, considerando-se as seguintes frações granulométricas: terra fina (< 2 mm), cascalho (2 a 20 mm), calhau (20 a 200 mm) e matacão (> 200 mm). A granulometria da fração terra fina foi realizada por peneiramento úmido seguido de sedimentação pelo método da pipeta. O NaOH 1 mol L^{-1} foi utilizado como dispersante, enquanto a argila natural foi dispersa em água (Teixeira *et al.*, 2017).

A densidade do solo (D_s), a macroporosidade (Ma) e a microporosidade (Mi) do horizonte superficial dos 17 perfis, foram determinadas por meio do método do anel volumétrico. Amostras com estrutura preservada dos horizontes superficiais dos perfis foram coletadas em cilindros de aço (0,050m de altura e diâmetro de 4,7mm x 50 cm de altura) com 3 repetições. A Ma foi obtida a partir do equilíbrio das amostras a 0,006 MPa e a Mi a partir do peso constante obtido após secagem em estufa a 105°C (Teixeira *et al.*, 2017).

4.2.3. Análises espectrográficas

A caracterização por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi realizada em todos os horizontes superficiais de cada perfil. Adicionalmente, em seis perfis selecionados (três RL e três RR), todos os horizontes identificados foram caracterizados. Antes da análise de FTIR, as amostras de solo associadas às frações MOP e MOAM foram moídas em almofariz de ágata.

As análises de FTIR foram realizadas na Central Analítica da Universidade Federal de Pelotas (CA/UFPEL). As análises foram executadas no modo de Refletância Total Atenuada (ATR) com cristal de seleneto de zinco, aplicando-se a correção de ATR. Utilizou-se um espectrômetro Shimadzu, modelo IR-Prestige 21, configurado com resolução de $4,0 \text{ cm}^{-1}$ e 64 varreduras por espectro, na faixa de 4.000 a 600 cm^{-1} . Os

espectros das réplicas foram submetidos à média, resultando em um único espectro representativo por amostra.

Os espectros obtidos foram suavizados e normalizados (0-1), no OriginPro 2016 (OriginLab Corporation, 2015). Na sequência, foram identificados os principais picos e bandas de absorção e calculadas as áreas relativas sob estas curvas. No Quadro 4.1 estão sumarizadas as bandas, em número de onda (cm^{-1}), utilizadas na interpretação dos espectros de FTIR das frações MOP e MOAM.

Quadro 1 – Grupos funcionais e estruturas atribuídos a números de onda na região do infravermelho médio (4.000 a 700 cm^{-1})

Nº de onda (cm^{-1})	Grupo funcional principal	Exemplos de compostos/estruturas
3.700 – 3.200	Estiramento O–H e N–H	Ácidos carboxílicos, fenóis, argilas hidratadas, proteínas
2.970 – 2.840	Estiramento C–H alifático	Lipídios, ceras, cutina
1.740 – 1.700	Estiramento C=O (carbonila/éster)	Ésteres, lactonas, lipídios oxidados
1.650 – 1.600	Amida I / C=O conjugado	Proteínas, compostos fenólicos
1.600 – 1.500	Amida II / C=C aromático	Proteínas, lignina, compostos aromáticos
1.475 – 1.350	Deformação C–H alifático / estiramento C–O carboxilato	Lipídios, compostos alifáticos, sais carboxilatos
1.200 – 1.050	Estiramento C–O / anel glicosídico	Polissacarídeos, celulose, hemicelulose, pectinas, exsudatos microbianos
1.050 – 700	Vibração fora do plano C–H aromático / Si–O	Aromáticos substituídos, minerais silicatados

Fonte: Adaptado de Fultz *et al.* 2014; Nandiyanto, Oktiani, Ragadhita, 2019; Pärnpuu *et al.* 2022

4.2.3.1. Índices estruturais da matéria orgânica do solo

Para caracterizar a qualidade molecular nas frações MOP e MOAM, foram calculados índices estruturais derivados das intensidades de absorvância de bandas obtidas via FTIR. O Índice de Aromaticidade (IAr), apresentado na equação 1, expressa a razão entre bandas espectrais atribuídas a compostos aromáticos e bandas associadas a cadeias alifáticas (Dick *et al.* 2008; Pärnpuu *et al.*, 2022).

$$\text{IAr} = \frac{\text{Aromáticos}_{(1.565)}}{\text{Alifáticos}_{(2.970 - 2.860)} + \text{Aromáticos}_{(1.565)}}, \quad [1]$$

Valores elevados de IAr indicam maior contribuição de compostos aromáticos, geralmente associados a maior persistência da MOS, enquanto valores baixos refletem predominância de estruturas alifáticas, típicas de resíduos vegetais frescos e mais lábeis.

O Índice de Hidrofobicidade (InH), reflete a relação entre os componentes hidrofóbicos e hidrofílicos da matéria orgânica (Obeng *et al.*, 2023):

$$\text{InH} = \frac{\text{Alifáticos}_{(2.970 - 2.860)}}{\text{Carboxílicos}_{(1.740)}} \quad [2]$$

Valores elevados de (InH) indicam uma predominância relativa de compostos hidrofóbicos (alifáticos) em relação aos carboxílicos, sugerindo uma MOS menos processada biologicamente, na qual as estruturas lipídicas e ceras originais dos resíduos vegetais foram preservadas frente à degradação. Em contrapartida, valores baixos de (InH) refletem uma maior contribuição de compostos hidrofílicos, como os grupos carboxílicos e carbonilas derivados da oxidação, caracterizando uma matéria orgânica processada, tornando-se acessível e suscetível à degradação microbiana.

4.2.4. Análises isotópicas do carbono e do nitrogênio

A análise por espectrometria de massa de razão isotópica foi realizada em seis perfis selecionados (três RL e três RR), em todos os horizontes identificados. As amostras das frações MOP e MOAM, com ~0,5 mg de solo, moídas em almofariz de ágata, foram acondicionadas em cápsulas de estanho e enviadas ao Centro Integrado de Análises da Universidade Federal do Rio Grande (CIA/FURG).

As análises foram realizadas em um Espectrômetro de Massa de Razão Isotópica – IRMS – EA Flash 2000 Delta V Advantage (ThermoFisher Scientific). Foi utilizado o He como gás de arraste, a uma vazão de 100 mL min⁻¹. No reator de oxidação, composto por óxido de cromo e óxido de cobalto com prata, a temperatura utilizada foi de 1.020°C. No reator de redução, composto por cobre metálico 650°C e, para separação cromatográfica, utilizou-se 50°C.

A quantificação dos teores de carbono e nitrogênio foi feita por comparação com os padrões analíticos por meio de curva padrão: cafeína (USGS61, 62 e 63) e ácido glutâmico (USGS40). Os padrões internos do laboratório (cafeína e ácido glutâmico) foram intercalados entre as amostras e apresentaram um desvio padrão de 0,1‰ para $\delta^{13}\text{C}$ e 0,4‰ para $\delta^{15}\text{N}$. O padrão internacional para o carbono foi o Vienna Pee Dee Belemnite (PDB) e, para o nitrogênio, o ar atmosférico. Os valores são apresentados em δ e expressos em ‰ na equação 3 (Bond e Hobson, 2012):

$$\delta^{13}\text{C} \text{ ou } \delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = \left[\left(\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} \right) - 1 \right] \times 10^3, \quad [3]$$

onde: $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ são as composições isotópicas; R_{amostra} é a razão isotópica do $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ e do $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$; $R_{\text{padrão}}$ é a razão isotópica do padrão internacional PDB.

Para distinguir as mudanças de cobertura vegetal nos perfis de solo analisados, os resultados do $\delta^{13}\text{C}$ foram interpretados assumindo que variações menores que 3‰ poderiam estar associadas à fracionamento isotópico, que pode ocorrer durante a decomposição da matéria orgânica, e com variações na composição isotópica do carbono do CO_2 atmosférico (Andriollo *et al.*, 2017).

A abundância relativa de carbono orgânico derivado de plantas com ciclo fotossintético C_3 e C_4 foi estimada para as frações granulométricas por meio de um modelo de mistura linear de duas fontes baseado no balanço de massas (Kirkels *et al.*, 2022). O cálculo fundamenta-se na assinatura isotópica do carbono $\delta^{13}\text{C}$ de cada fração, utilizando as seguintes equações (4 e 5):

$$\%C_3 = \left(\frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{amostra}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_4}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3} - \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_4}} \right) \cdot 100 \quad [4]$$

$$\%C_4 = 100 - \%C_3 \quad [5]$$

Onde: $\%C_3$ e $\%C_4$ representam, respectivamente, os percentuais de carbono derivados de plantas C_3 e C_4 na amostra; $\delta^{13}\text{C}_{\text{amostra}}$ é o valor isotópico medido na fração granulométrica correspondente (MOP ou MOAM); $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3}$ é o valor de referência final

para a vegetação de ciclo C₃, fixado em -27‰ com base em médias globais da literatura e $\delta^{13}\text{C}_{\text{C4}}$ é o valor de referência final para a vegetação de ciclo C₄, fixado em -13‰.

4.2.5. Análise estatística

Inicialmente verificou-se os pressupostos de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homoscedasticidade (teste de Levene). Posteriormente, realizou-se a análise da variação (ANOVA) utilizada para avaliar as diferenças entre as médias e, como procedimento *pós-hoc*, o teste de Tukey para comparação entre grupos (classes de Neossolos e usos alternativos do solo). Para situações nas quais a suposição de homogeneidade de variâncias não tenha sido atendida, foi aplicado o teste *t* de Welch. Quando as condições de normalidade e homoscedasticidade não tenham sido atendidas, em complemento, foram realizados os testes não paramétricos de Kruskal-Wallis e de Mann-Whitney para comparar as medianas entre os grupos, seguidos do teste *post hoc* de Dunn. Todos os testes foram conduzidos considerando-se o nível de significância $\alpha = 0,05$.

Em complemento aos testes de comparação paramétricos e não-paramétricos, foram calculados índices que expressam a magnitude e a estrutura da variabilidade entre os dados. Como medida de tamanho de efeito, foi utilizado o ômega quadrado (ω^2) – equação 6, para estimar a proporção da variância total explicada pelos fatores em análise (Fan; Konold, 2010).

$$\omega^2 = \frac{SQ_{\text{entre}} - (gl_{\text{entre}} \cdot QM_{\text{erro}})}{SQ_{\text{total}} + QM_{\text{erro}}}, \quad [6]$$

onde: SQ_{entre} é a Soma de Quadrados entre grupos (variabilidade explicada pelo fator); gl_{entre} são os graus de liberdade entre grupos (número de grupos - 1); QM_{erro} é o Quadrado Médio do erro (variabilidade média dentro dos grupos); SQ_{total} é a Soma de Quadrados total (variabilidade total observada). O tamanho do efeito foi considerado pequeno ($\omega^2 < 0,20$); moderado ($0,20 \leq \omega^2 < 0,40$), grande ($0,40 \leq \omega^2 < 0,60$) e muito grande ($\omega^2 > 0,60$).

Para avaliar a consistência interna dos grupos, utilizou-se o coeficiente de correlação intraclasse (ICC) (Xian; Zhang, 2025) que expressa a proporção da variabilidade atribuída às diferenças dos grupos em relação à variabilidade total (equação 7).

$$ICC = \frac{\sigma_{\text{grupo}}^2}{\sigma_{\text{grupo}}^2 + \sigma_{\text{erro}}^2}, \quad [7]$$

onde: σ_{grupo}^2 é variância entre grupos; σ_{erro}^2 é a variância do erro. Os resultados do ICC foram classificados como de fraca confiabilidade ($ICC < 0,25$); moderada confiabilidade ($0,25 \leq ICC < 0,50$), alta confiabilidade ($0,50 \leq ICC < 0,75$) e muito alta confiabilidade ($\geq 0,75$).

A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada ao conjunto mínimo de variáveis químicas, físicas e biológicas e buscou estabelecer as principais interações entre estes indicadores e o conjunto de Neossolos avaliados. O critério de Kaiser (autovalores $> 1,0$) foi utilizado para selecionar as componentes principais (CP) significativas. Todas as análises foram realizadas utilizando-se o software Past 4.03® (Hammer; Harpper; Ryan, 2001).

4.3. Resultados

4.3.1. Análise de propriedades físicas dos Neossolos

A composição granulométrica dos Neossolos (Tabela 4.1) revelou solos com preponderância da fração areia que, em média, foi de 592 g kg^{-1} ($\pm 45 \text{ g kg}^{-1}$) nos RL e 606 g kg^{-1} ($\pm 70 \text{ g kg}^{-1}$) nos RR. A amplitude de variação foi menor em RL (61 g kg^{-1}) que nos RR (128 g kg^{-1}), mas com baixos coeficientes de variação, de 8% e 12%, respectivamente. A argila respondeu pelas menores contribuições à composição granulométrica dos Neossolos, com 144 g kg^{-1} ($\pm 44 \text{ g kg}^{-1}$) em RL e 150 g kg^{-1} ($\pm 150 \text{ g kg}^{-1}$) em RR, com coeficientes de variação moderados de 31% e 28%, respectivamente,

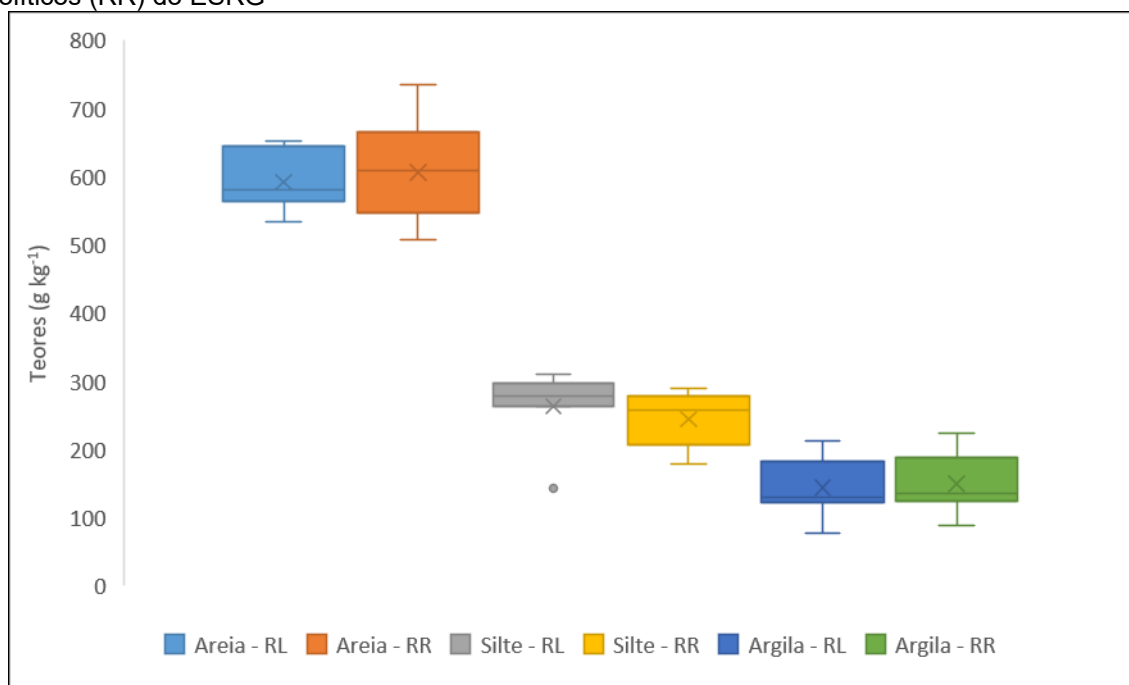
e amplitude de variação de 135 g kg^{-1} , em ambas as classes. Na Figura 4.2 destaca-se a grande semelhança entre as distribuições da fração argila em RL e RR. O silte resultou em valores intermediários, mais próximos da fração argila (Figura 4.2), donde o valor mínimo observado em RL destacou-se como um dado discrepante.

Tabela 4.1 – Valores da composição granulométrica (g kg^{-1}) dos perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESG

Estatísticas	Areia		Silte		Argila	
	RL	RR	RL	RR	RL	RR
N.º de perfis	7	10	7	10	7	10
Mínimo	533	508	143	178	77	88
Máximo	653	734	311	290	212	223
Média	592	606	264	244	144	150
Desvio Padrão	45	70	56	39	44	42
Mediana	580	609	278	258	130	135
Percentil – 0,25	564	547	263	207	123	124
Percentil – 0,75	645	666	297	279	183	188
Coeficiente de Variação	8	12	21	16	31	28

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4.2 – *Boxplot* das frações granulométricas (g kg^{-1}) dos perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESG



Fonte: elaborado pelo autor

A normalidade da distribuição dos dados, verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, para os teores de areia resultou não significativa ($W=0,9712$; $p=0,8385$), com variâncias homogêneas pelo teste de Levene ($p=0,3701$). O teste de Shapiro-Wilk para os teores de silte ($W=0,8685$) refutou a normalidade da distribuição ($p=0,0208$), em função do valor discrepante observado, embora tenha apresentado variâncias homogêneas pelo teste de Levene ($p=0,9575$). Os teores de argila apresentaram normalidade com $W=0,9424$ ($p=0,3481$) e homogeneidade de variâncias ($p=0,9904$). A análise da variação (ANOVA) não resultou em diferenças estatísticas para os teores de areia ($p=0,6649$), silte ($p=0,4131$) e argila ($p=0,7828$).

Os resultados das análises de densidade e porosidade do solo estão apresentados na Tabela 4.2. Os valores de densidade do solo (D_s) variaram entre 1,16 e 1,58 g cm⁻³ nos RL e entre 1,12 a 1,43 g cm⁻³ nos RR. A D_s não apresentou diferenças estatísticas entre Neossolos Litólicos e Regolíticos quando submetidos à ANOVA ($F = 1,06$; $p = 0,319$) e ao teste de Kruskal-Wallis ($p = 0,344$). A porosidade total (PT) variou de 0,30 m³ m⁻³ (P10), em Neossolo Litólico sob em área de lavoura até 0,54 (P12) em Neossolo Regolítico sob mata nativa. A PT resultou homogênea entre RL (0,44 m³ m⁻³; $dp = \pm 0,07$ m³ m⁻³) e RR (0,46 m³ m⁻³, $dp = \pm 0,04$ m³ m⁻³) ($F = 0,5784$, $p = 0,4587$).

Em relação a macro (Ma) e microporosidade (Mi) os Neossolos variaram substancialmente. Enquanto Neossolos Litólicos apresentaram microporosidade relativamente superior aos Regolíticos, nestes a macroporosidade foi superior. Os valores de macroporosidade superiores a 0,20 m³ m⁻³ foram observados apenas em RR, em áreas de mata nativa (P8, P9, P12 e P13), campo nativo (P14 e P16) e no pomar P17. Nos RL, A microporosidade elevada ($>0,35$) ocorreu em áreas de lavoura (P2), em pomares (P6 e P7) e em campo nativo (P1 e P11).

Os resultados dos testes de comparação (Apêndice C) identificaram valores médios de macroporosidade significativamente maiores nos RR (0,24 m³ m⁻³, $dp = \pm 0,06$) em comparação aos RL (0,13 m³ m⁻³; $dp = \pm 0,04$). A ANOVA revelou uma diferença altamente significativa ($F = 16,25$; $p = 0,0011$) e o teste de Kruskal-Wallis ($H_c = 9,22$; $p = 0,0024$) confirmou esse resultado. Em relação à microporosidade (Mi), os

Neossolos Litólicos apresentaram valores médios superiores ($0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) quando comparados aos Regolíticos ($0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A ANOVA indicou diferença significativa ($F = 5,62$; $p = 0,0316$), corroborada pelo teste de Kruskal-Wallis ($H_c = 4,44$; $p = 0,0350$).

Tabela 4.2 – Valores de densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi), em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes usos do solo

Classe	Perfil	Uso do Solo	Ds	PT	Ma	Mi
			g cm^{-3}	$(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$		
RL	P1	Campo	1,31	0,46	0,11	0,35
	P2	Lavoura	1,16	0,50	0,07	0,43
	P6	Lavoura/pomar	1,42	0,44	0,09	0,35
	P7	Pomar	1,20	0,52	0,15	0,37
	P10	Lavoura	1,58	0,30	0,19	0,11
	P11	Campo	1,33	0,49	0,14	0,35
	P15	Pomar	1,47	0,40	0,14	0,26
RR	P3	Lavoura/pomar	1,34	0,42	0,15	0,27
	P4	Lavoura/pomar	1,32	0,43	0,15	0,28
	P5	Lavoura/pomar	1,43	0,43	0,18	0,25
	P8	Mata nativa	1,12	0,50	0,21	0,29
	P9	Mata nativa	1,38	0,45	0,27	0,18
	P12	Mata nativa	1,12	0,54	0,28	0,26
	P13	Mata nativa	1,15	0,47	0,25	0,22
	P14	Campo	1,37	0,46	0,25	0,21
	P16	Campo	1,24	0,47	0,34	0,13
	P17	Pomar	1,39	0,48	0,30	0,18

Fonte elaborado pelo autor

4.3.2. Análise dos padrões espectrográficos da matéria orgânica do solo

As diferenças físicas entre Neossolos Litólicos e Regolíticos, evidenciadas pela maior microporosidade nos primeiros e pela predominância de macroporos nos segundos, condicionam rotas contrastantes na dinâmica da MOS. Nos Regolíticos, a predominância da macroporosidade favorece maior difusão de oxigênio e intensifica os ciclos hídricos e biogeoquímicos. Esse padrão se reflete nos valores mais elevados da faixa espectral $1000 - 700 \text{ cm}^{-1}$, indicando maior acúmulo de polissacarídeos frescos. Em contraste, nos Litólicos, a microporosidade elevada restringe a circulação de gases e água e reduz a degradação imediata dos resíduos. Isto favorece a retenção de compostos mais estáveis, como lipídios e estruturas aromáticas, confirmada pelos

índices de hidrofobicidade (InH) e aromaticidade (IAr), que apresentaram valores mais altos em RL. Essas condições estruturais se refletem diretamente nas assinaturas espectrais obtidas por FTIR. Na fração MOP, que reflete o aporte recente, destacaram-se diferenças robustas em bandas alifáticas e polissacarídicas entre as classes. Por outro lado, na fração MOAM, embora a composição média seja semelhante, emergem contrastes significativos nos compostos alifáticos/lipídicos, além de variações nos índices estruturais de hidrofobicidade, aromaticidade. Assim, a análise espectroscópica revela como as diferenças na porosidade dos Neossolos estabelece caminhos distintos para a transformação molecular da MOS, diferenciando ambientes de maior labilidade daqueles de maior persistência química e organomineral.

4.3.3. Análise das regiões espectrais da MOP

A aplicação dos testes paramétricos e não-paramétricos revelou que os números de onda correspondentes a 3700 cm^{-1} e 1565 cm^{-1} (Tabela 4.3) não apresentaram diferenças estatísticas entre as duas classes de Neossolos. A restrição em atingir o nível crítico de significância ($p < 0,05$) decorreu do tamanho reduzido da amostra frente à alta dispersão dos dados.

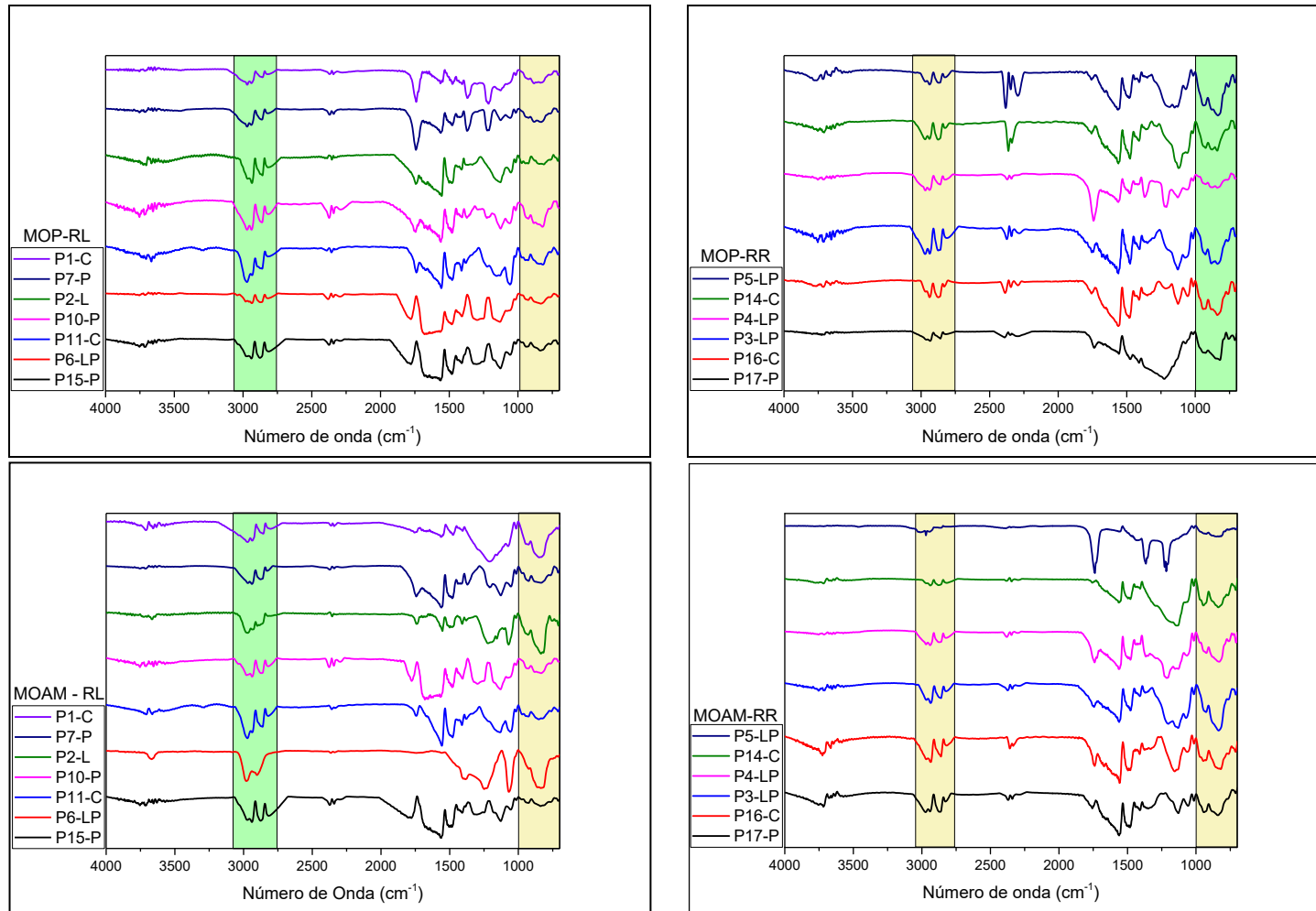
O tamanho da amostra também influenciou no resultado da faixa espectral de $1475 - 1350\text{ cm}^{-1}$ e no comprimento de onda de 1740 cm^{-1} , onde os resultados dos testes paramétricos e não-paramétricos foram contraditórios. Para o número de onda de 1740 cm^{-1} , os testes paramétricos não acusaram efeito significativo (ANOVA, $p = 0,1098$; Welch, $p = 0,0890$), com tamanho de efeito pequeno ($\omega^2 = 0,1001$ e baixa confiabilidade (ICC = $0,1866$)). Essa divergência decorre da alta dispersão dos dados e do tamanho reduzido da amostra. Os testes não-paramétricos, mais robustos nessas condições, confirmaram diferenças significativas entre as medianas de RL e RR (Kruskal-Wallis, $p = 0,0404$; Mann-Whitney, $p = 0,0454$). Esse mesmo padrão foi observado na faixa de $1475 - 1350\text{ cm}^{-1}$, onde a ANOVA ($p = 0,1494$) e o teste de Welch ($p = 0,1293$) resultaram não significativos, confirmado pelo efeito quase nulo

dado pelo ω^2 e a baixa confiabilidade do ICC = 0,1371. Em contrapartida, o teste de Kruskal-Wallis ($p = 0,0315$) detectou a existência de diferenças significativas entre as duas classes, resultado confirmado pelos testes de Mann-Whitney ($p = 0,0356$) e *post hoc* de Dunn ($p = 0,0315$).

As faixas correspondentes aos comprimentos de onda de 2970 – 2840 cm^{-1} e 1000 – 700 cm^{-1} , entretanto, revelaram diferenças altamente significativas, com convergência entre os testes estatísticos empregados (Figura 4.3). Na região de estiramentos C-H alifáticos (2970 – 2840 cm^{-1}), a diferença entre RL e RR foi validada tanto pelas abordagens paramétricas (ANOVA, $p = 0,0292$; Welch, $p = 0,0343$) quanto pelas não-paramétricas (Kruskal-Wallis, $p = 0,0111$; Mann-Whitney, $p = 0,0128$), suportada por um tamanho de efeito moderado ($\omega^2 = 0,2205$; ICC = 0,3686). Os RL demonstraram maior acúmulo desses compostos, concentrando-se firmemente entre 15,0% e 19,4% na maioria dos perfis, enquanto os Neossolos Regolíticos registraram maior declínio, atingindo valores mínimos de até 4,7%.

A diferenciação mais robusta e de alta significância foi verificada no agrupamento de 1000 – 700 cm^{-1} . A diferença entre Neossolos Litólicos e Regolíticos nesta região espectral foi altamente significativa, tanto em testes de médias (ANOVA, $p = 0,00109$; Welch, $p = 0,00057$) quanto de medianas (Kruskal-Wallis, $p = 0,00128$). A magnitude do efeito foi classificada como forte, ($\omega^2 = 0,4727$) e de alta confiabilidade (ICC = 0,6491). Isso indica que a diferença espectral entre RL e RR é consistente e explica grande parte da variabilidade observada, reforçando a relevância da arquitetura porosa como fator controlador da persistência da MOS. Os perfis em Neossolos Regolíticos apresentaram valores mais elevados nesta faixa, variando de 15,2% a 32,7%, enquanto os Neossolos Litólicos mantiveram-se restritos a patamares significativamente menores, entre 8,1% a 17,4%.

Figura 4.3 – Espectros de absorvância normalizada (0-1) de MOP e MOAM, em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diversos usos do solo



Legenda: C – campo; L – lavoura; LP – lavoura/pomar; P – pomar
 Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.3 – Intensidade relativa (percentual de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), obtidas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), na matéria orgânica particulada (MOP) de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes sistemas de uso do solo

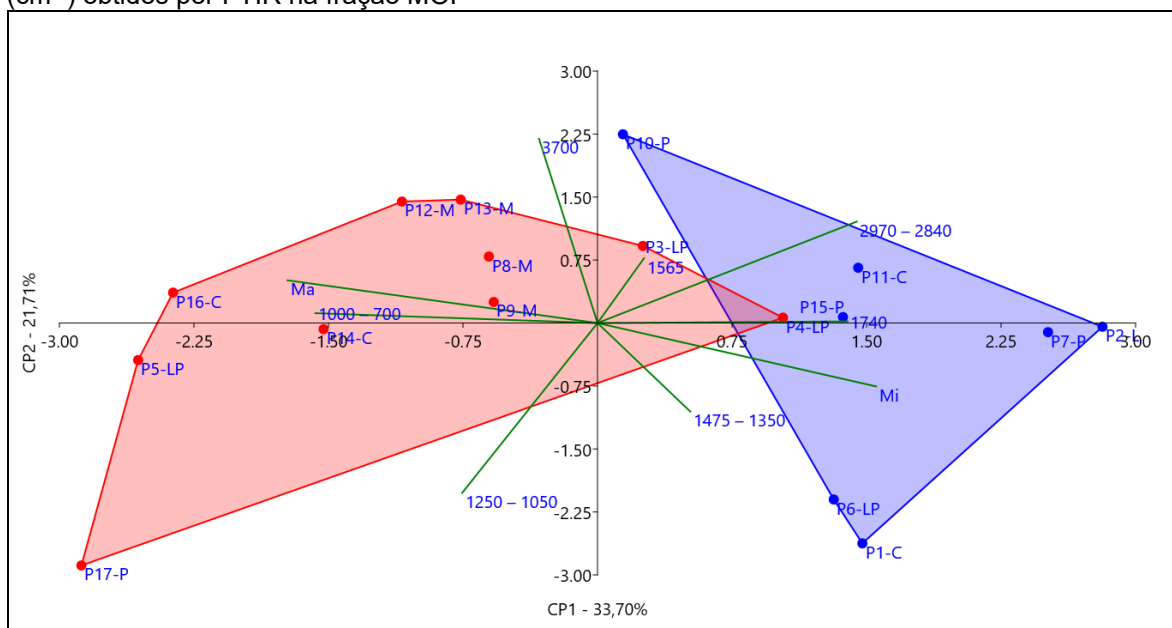
Perfil	Classe	Uso do Solo	3700 - 3200	2970 – 2840	1740 – 1700	1650 – 1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
P1	RL	Campo	0,3	16,0	11,3	5,9	19,5	29,6	17,4
P2	RL	Lavoura	4,7	16,6	11,7	26,3	13,6	14,7	12,3
P6	RL	Lavoura/pomar	1,0	6,8	8,9	30,3	14,9	30,1	8,1
P7	RL	Pomar	3,8	18,0	17,8	17,7	15,7	12,8	14,1
P10	RL	Pomar	12,8	17,9	11,9	18,9	10,5	14,2	13,9
P11	RL	Campo	11,7	19,4	4,3	18,2	14,2	21,8	10,4
P15	RL	Pomar	6,4	15,0	10,1	24,9	14,2	21,0	8,5
P3	RR	Lavoura/pomar	10,9	15,8	6,5	17,6	11,9	18,7	18,7
P4	RR	Lavoura/pomar	6,9	12,8	17,6	15,9	11,5	18,9	16,2
P5	RR	Lavoura/pomar	6,7	6,4	1,1	17,7	7,1	28,4	32,7
P8	RR	Mata nativa	13,2	8,9	15,9	10,4	8,0	20,6	23,0
P9	RR	Mata nativa	3,3	14,6	8,8	23,1	13,1	18,9	18,3
P12	RR	Mata nativa	9,8	14,8	4,1	22,3	9,8	16,6	22,7
P13	RR	Mata nativa	13,1	13,3	2,5	24,4	13,4	18,1	15,2
P14	RR	Campo	8,5	10,1	2,1	20,6	13,4	26,5	18,8
P16	RR	Campo	6,2	7,9	2,7	25,0	20,2	12,1	25,8
P17	RR	Pomar	1,9	4,7	3,6	10,6	13,5	45,8	19,8

Fonte: elaborado pelo autor

4.3.4. Análise de Componentes Principais na MOP

A análise de componentes principais (ACP) resultou em três componentes significativas (critério de Kaiser > 1), que em conjunto explicaram 71,50% da variância total e destacaram diferenças marcantes entre os perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos. As duas primeiras componentes (CP1 e CP2) acumularam, 55,41% da variabilidade dos dados e foram utilizadas para a construção do *biplot* (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Dispersão dos perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos e dos vetores de carregamentos (*loadings*) para macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e números de onda (cm^{-1}) obtidos por FTIR na fração MOP



Legenda: Neossolos Litólicos (●); Neossolos Regolíticos (●); C – campo; L – lavoura; LP – lavoura/pomar; M – mata nativa; P – pomar; Ma – macroporosidade; Mi – microporosidade

Fonte: elaborado pelo autor

As relações entre os vetores e os perfis de Neossolos na CP1 evidenciaram um gradiente físico-químico governado pela oposição entre a macro e a microporosidade do solo. A dimensão positiva da CP1 apresentou forte associação da microporosidade ($Mi = 0,43$) com números de onda de 2970-2840 (0,40) e 1740 cm^{-1} (0,39). Essas bandas são caracterizadas, respectivamente, pelo estiramento de ligações C-H alifáticas hidrofóbicas e pelo estiramento C=O de ácidos carboxílicos ou ésteres da MOS. Essa relação projeta o polígono dos Neossolos

Litólicos (RL), sugerindo que a microporosidade atua como um ambiente de retenção de compostos funcionais alifáticos e carboxílicos, possivelmente conferindo-lhes proteção física. Em contrapartida, no domínio negativo da CP1, projetou-se o polígono dos Neossolos Regolíticos (RR), onde a macroporosidade ($Ma = -0,48$) alinhou-se ao vetor da região de $1000-700\text{ cm}^{-1}$ ($-0,44$). Essa faixa é classicamente dominada por estiramentos Si-O característicos de silicatos e minerais da fração argila e sinais orgânicos de polissacarídeos. A CP2 (21,71%) atuou como um eixo de interação organomineral versus labilidade, isolando os mecanismos de proteção física e as respostas biológicas induzidas pelos diferentes usos do solo. Este alinhamento reforça a distinção entre solos com maior aporte de celulose/hemicelulose e aqueles dominados por compostos mais simples. Na dimensão positiva da CP2, o gradiente é governado pelo *loading* da banda de 3700 cm^{-1} (0,61), associada às hidroxilas estruturais de argilominerais, onde destacam-se perfis como o P10 (RL) e os perfis de mata nativa (P12 e P13). Na dimensão negativa da CP2, o gradiente é dominado pelo carregamento do agrupamento de bandas de $1250 - 1050\text{ cm}^{-1}$ ($-0,56$). Dada a ausência de purificação prévia das amostras, essa região reflete a sobreposição de ligações C-O de polissacarídeos e deformações axiais minerais, agrupando os perfis P1 (RL - campo) e P17 (RR - Pomar).

A CP3 representou 16,1% da variância total e estabeleceu um gradiente entre estabilidade química e labilidade da MOS, sem apresentar carregamentos expressivos em macro e microporosidade. A CP3 foi dominada pelas faixas de 1565 cm^{-1} (+0,62) e $1475 - 1350\text{ cm}^{-1}$ (+0,54), correspondentes a estiramentos de ânions carboxilatos (COO^-) envolvidos em interações organominerais e deformações alifáticas. em oposição à banda de 1740 ($-0,33$).

4.3.5. Indicadores espectroscópicos da qualidade química da MOP

Os Neossolos Litólicos (RL) apresentaram ampla variação nos valores de IAr (0,27–0,82), indicando diferentes graus de transformação dos resíduos

orgânicos (Tabela 4.4). O menor valor foi observado na área de campo P1 (0,27), sugerindo predomínio de compostos alifáticos. Em contraste, o P6 (lavoura/pomar) apresentou o maior IAr (0,82), indicando tendência de enriquecimento em estruturas aromáticas. Os demais perfis sob pomar (P7, P10 e P15) exibiram valores intermediários (0,50–0,62). Nos Neossolos Regolíticos (RR), os valores de IAr foram mais homogêneos (0,53–0,76), predominando índices entre 0,60 e 0,70.

O comportamento do InH mostrou variabilidade ainda maior. Nos RL, destacaram-se os valores muito elevados na área de campo P11 (4,51) e os menores valores observados em P6 (0,76) e P7 (1,01). O elevado InH do P11 indicou maior presença de compostos alifáticos hidrofóbicos, enquanto em P6 o baixo InH indicou maior proporção de grupos carboxílicos. Nos RR, o InH variou entre 0,56 e 5,82, com os menores valores ocorrendo em mata nativa (P8) e em P4. Em contraste, P5 (5,82) e P13 (5,32) apresentaram maior proporção relativa de compostos hidrofóbicos.

Tabela 4.4 – Índices de aromaticidade (IAr) e de Hidrofobicidade (InH) da MOP, em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes usos do solo

Classe	Perfis	Uso do Solo	IAr	InH
RL	P1	Campo	0,27	1,42
	P2	Lavoura	0,61	1,42
	P6	Lavoura/pomar	0,82	0,76
	P7	Pomar	0,50	1,01
	P10	Pomar	0,51	1,50
	P11	Campo	0,48	4,51
	P15	Pomar	0,62	1,49
RR	P3	Lavoura/pomar	0,53	2,43
	P4	Lavoura/pomar	0,55	0,73
	P5	Lavoura/pomar	0,73	5,82
	P8	Mata nativa	0,54	0,56
	P9	Mata nativa	0,61	1,66
	P12	Mata nativa	0,60	3,61
	P13	Mata nativa	0,65	5,32
	P14	Campo	0,67	4,81
	P16	Campo	0,76	2,93
	P17	Pomar	0,69	1,31

Fonte: elaborado pelo autor

Considerando os usos do solo, observa-se que os campos apresentaram elevada heterogeneidade, incluindo perfis pouco aromáticos (P1) e outros relativamente aromáticos (P14 e P16), além de elevados valores de InH (P11 e P14). As áreas de lavoura apresentaram comportamento contrastante entre os RL, com P2 exibindo maior aromaticidade e InH moderado, enquanto a integração lavoura/pomar apresentou desde matéria orgânica bastante aromática e oxidada (P6) até perfis predominantemente hidrofóbicos (P5). Os pomares apresentaram valores intermediários para ambos os índices (IAr 0,50–0,69 e InH 1,01–1,50). Em mata nativa a aromaticidade foi moderada e homogênea (0,54–0,65), enquanto a hidrofobicidade apresentou ampla variação (0,56–5,32).

4.3.6. Análise das regiões espectrais na MOAM

Nas análises espectroscópicas realizadas em MOAM (Tabela 4.5) verificou-se que, para a maioria das bandas avaliadas, as comparações entre Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) não apresentaram diferenças estatísticas. Estes resultados sugerem que, em geral, a composição química dessa fração da MOS é semelhante entre as duas classes de solo. Entretanto, para a banda 2970 – 2840 cm^{-1} , atribuída a compostos alifáticos/lipídicos (estiramentos C–H de ceras, cutina e suberina), os resultados evidenciaram uma clara distinção. A distribuição dos dados foi aproximadamente normal ($W=0,9384$, $p=0,3002$) com variâncias homogêneas (teste de Levene $p=0,5292$). A análise da variação (ANOVA) revelou uma diferença altamente significativa ($F = 23,91$; $p = 1,96 \times 10^{-4}$), confirmada pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($H_c = 9,164$; $p = 0,002$). O valor de ω^2 (0,574) indicou um efeito de magnitude elevada que associado a alta confiabilidade dada pelo coeficiente de correlação intraclassa ($ICC = 0,736$) demonstra que grande parte da variabilidade observada é explicada pela diferença entre as classes (Apêndice C).

Tabela 4.5 – Intensidade relativa (percentual de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), obtidas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), na matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes sistemas de uso do solo

Classe	Perfis	Uso do Solo	3700 – 3200	2970 – 2840	1740 – 1700	1650 – 1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
RL	P1	Campo	3,7	17,7	6,4	4,3	2,9	40,3	24,8
	P2	Lavoura	1,9	16,4	3,3	4,1	7,1	33,2	34,0
	P6	Lavoura/pomar	2,8	18,2	1,5	0,4	14,1	37,9	25,1
	P7	Pomar	1,3	11,3	11,5	23,1	18,4	15,5	18,9
	P10	Pomar	7,8	12,1	4,4	26,9	11,2	23,5	14,1
	P11	Campo	12,2	21,3	1,9	15,5	15,6	23,1	10,4
	P15	Pomar	6,4	21,3	13,1	23,7	12,0	16,3	7,2
RR	P3	Lavoura/pomar	6,1	8,8	6,9	16,8	7,6	24,1	29,7
	P4	Lavoura/pomar	2,1	8,4	8,2	15,2	11,0	36,1	19,0
	P5	Lavoura/pomar	0,3	6,8	18,0	3,2	23,2	32,2	16,3
	P8	Mata nativa	6,6	4,9	4,6	11,3	4,9	40,8	26,9
	P9	Mata nativa	1,6	5,4	6,5	28,1	29,0	13,1	16,3
	P12	Mata nativa	9,8	11,0	3,6	19,1	11,7	21,4	23,4
	P13	Mata nativa	17,0	9,9	7,9	10,4	9,0	21,0	24,7
	P14	Campo	2,8	4,3	0,2	10,7	6,1	48,6	27,3
	P16	Campo	12,2	12,3	5,6	21,4	14,6	15,6	18,3
	P17	Pomar	11,6	13,1	3,9	23,7	20,1	9,0	18,6

Fonte: elaborado pelo autor

4.3.7. Análise de Componentes Principais na MOAM

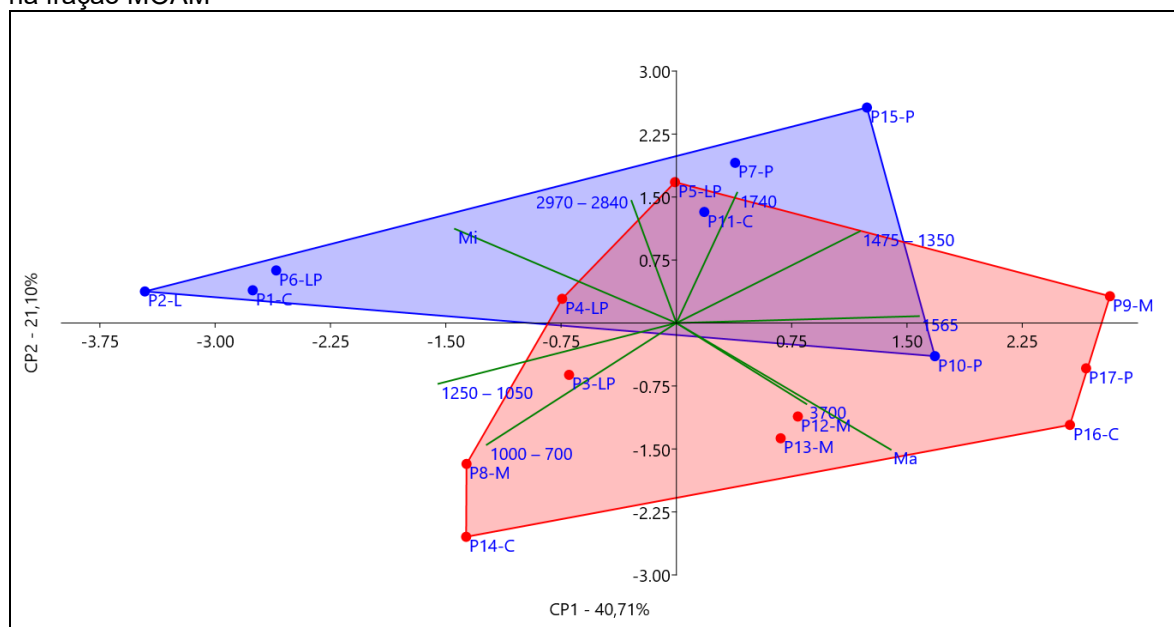
A ACP aplicada à fração MOAM resultou significativa (critério de Kaiser) para três componentes que, em conjunto, explicaram 78,91% da variância total dos dados. A primeira componente (CP1) apresentou o maior poder explicativo (40,71%), enquanto a CP2 e a CP3 explicaram, respectivamente, 21,10% e 17,10% (Figura 4.5).

A CP1 caracterizou um gradiente capaz de diferenciar perfis com maior proporção de compostos estáveis quimicamente e macroporosidade predominante, daqueles dominados por carboidratos lábeis e microporos. Na dimensão positiva da CP1 (40,71%) destacaram-se os vetores associados ao número de onda de 1565 cm^{-1} (0,44) de ânions carboxilatos (COO^-) interagindo com a superfície dos minerais, à faixa de $1475 - 1350\text{ cm}^{-1}$ (0,33; grupos metila/metileno) e à macroporosidade ($\text{Ma} = 0,39$). Em contrapartida, na dimensão negativa, as bandas de polissacarídeos em $1.250 - 1050\text{ cm}^{-1}$ (-0,43) e $1000 - 700\text{ cm}^{-1}$ (-0,34), além da microporosidade ($\text{Mi} = -0,40$) foram os vetores que mais influenciaram o comportamento dos dados.

A CP2 atuou como um indicador de labilidade e enriquecimento alifático da MOS. Na CP2 (21,1%) o número de onda de 1740 cm^{-1} (0,43; carbonilas de ácidos graxos/ésteres) e as faixas de $2970 - 2840\text{ cm}^{-1}$ (0,41; estiramento C–H alifático) e $1475 - 1350\text{ cm}^{-1}$ (0,31), carregaram positivamente. Em contraposição, no domínio negativo da CP2 as cargas negativas correlacionaram-se com a Ma (-0,42) e nas bandas minerais de 3700 cm^{-1} (-0,27; estiramento O–H livre de caulinita). Essa componente refletiu a variação entre perfis com acentuado caráter orgânico hidrofóbico e carboxílico e aqueles mais associados à estrutura física e mineral do solo.

A CP3 (17,1%) discriminou variações moleculares independentes da estrutura porosa do solo. A dimensão positiva da CP3 foi controlada pela forte associação entre a faixa de $2970 - 2840\text{ cm}^{-1}$ (0,63; estiramento C–H alifático), 3700 cm^{-1} (0,55; estiramento O–H livre mineral). Este alinhamento sugere interações específicas entre frações alifáticas hidrofóbicas e as superfícies hidroxiladas das argilas. O domínio negativo, por sua vez, foi demarcado pela oposição das bandas de 1740 cm^{-1} (-0,39) e da faixa de $1475 - 1350\text{ cm}^{-1}$ (-0,29).

Figura 4.5 – Dispersão dos perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos e dos vetores de carregamentos (*loadings*) para macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e números de onda (cm^{-1}), obtidos por FTIR na fração MOAM



Legenda: Neossolos Litólicos (●); Neossolos Regolíticos (●); C – campo; L – lavoura; LP – lavoura/pomar; M – mata nativa; P – pomar; Ma – macroporosidade; Mi – microporosidade

Fonte: elaborado pelo autor

4.3.8. Indicadores espectroscópicos da qualidade química da MOAM

A análise dos índices estruturais da MOAM (Tabela 4.6) revelou padrões distintos daqueles observados na MOP. Enquanto a MOP refletiu o aporte recente e mais lábil, na MOAM predominaram processos de estabilização de longo prazo.

Os RL apresentaram ampla variação nos valores de IAr (0,02–0,69). Os perfis P1, P2 e P6 apresentaram valores muito baixos (0,02–0,20), indicando diferentes graus de aromaticidade na MOAM. O valor extremamente reduzido do P6 (0,02) sugere predomínio quase exclusivo de estruturas alifáticas ou forte diluição dos compostos aromáticos. Em contraste, P7 (0,67) e P10 (0,69) apresentaram valores elevados em compostos aromáticos, indicando associação preferencial de moléculas mais recalcitrantes à fração mineral. Nos RR, os valores de IAr foram elevados e relativamente homogêneos (0,32–0,84), destacando-se P9 (0,84) como o perfil mais aromático.

O comportamento do InH revelou amplitude de variação ainda mais expressiva. Nos RL o InH variou de 0,98 a 12,13, com valores muito elevados em P6 (12,13) e P11 (11,21), revelando maior hidrofobicidade associada à fração MOAM. Em contraste, P7 (0,98) e P15 (1,63) apresentaram valores baixos, compatíveis com maior proporção de grupos carboxílicos. Nos RR, o InH variou entre 0,38 (P5) e 3,36 (P17) na maioria dos perfis, mas P14 apresentou valor excepcionalmente elevado (21,50).

Considerando os usos do solo, áreas de campos apresentaram elevada heterogeneidade nos dois índices, com perfis de menor IAr, como P1 (RL), e perfis com valores mais elevados como P14 e P16 (em RR), além de ampla variação em InH. As áreas de lavoura/pomar apresentaram elevada heterogeneidade, com perfis pouco aromáticos (P6) e perfis com hidrofobicidade muito elevada (P14). Os pomares exibiram valores intermediários para ambos os índices. Em matas nativas, o IAr apresentou valores intermediários com menor amplitude (0,51-0,84) e o InH, ao contrário, apresentou maior variabilidade (0,83–3,06).

Tabela 4.6 – Índices de Hidrofobicidade (InH) e de aromaticidade (IAr) da MOAM, em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes usos do solo

Classe	Perfis	Uso do Solo	IAr	InH
RL	P1	Campo	0,19	2,77
	P2	Lavoura	0,20	4,97
	P6	Lavoura/pomar	0,02	12,13
	P7	Pomar	0,67	0,98
	P10	Pomar	0,69	2,75
	P11	Campo	0,42	11,21
	P15	Pomar	0,53	1,63
RR	P3	Lavoura/pomar	0,66	1,28
	P4	Lavoura/pomar	0,64	1,02
	P5	Lavoura/pomar	0,32	0,38
	P8	Mata nativa	0,70	1,07
	P9	Mata nativa	0,84	0,83
	P12	Mata nativa	0,63	3,06
	P13	Mata nativa	0,51	1,25
	P14	Campo	0,71	21,50
	P16	Campo	0,63	2,20
	P17	Pomar	0,64	3,36

Fonte: elaborado pelo autor

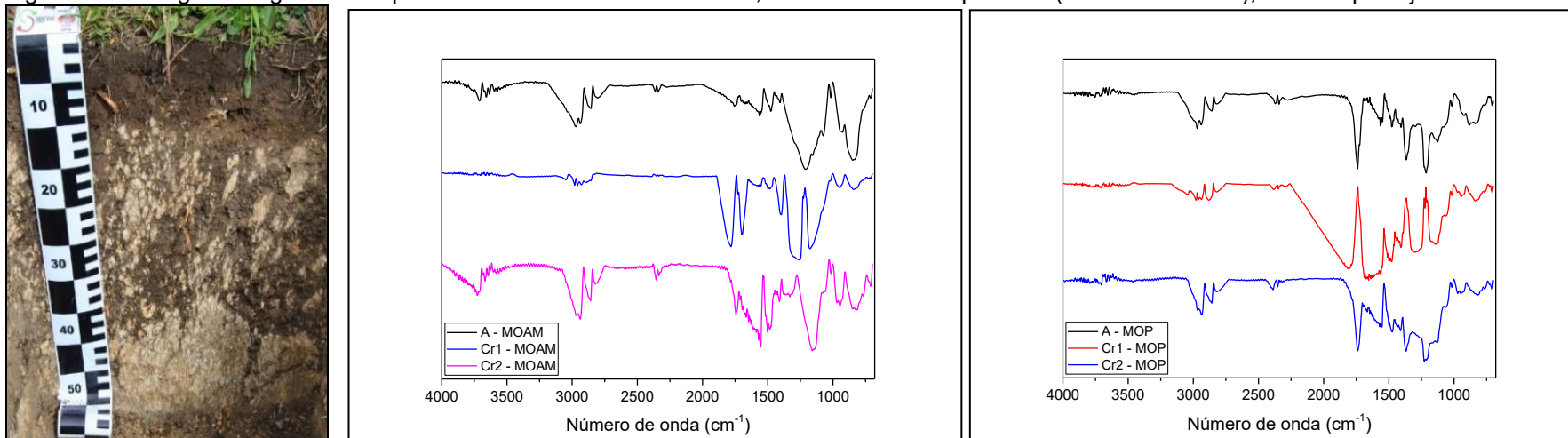
4.3.9. Caracterização da matéria orgânica ao longo dos perfis de Neossolos

As análises de FTIR ao longo dos seis perfis de Neossolos (P1, P3, P6, P8, P10 e P17) são apresentadas nas Figuras 4.6 a 4.11 e nas Tabelas 4.7 a 4.18. Os resultados evidenciaram um declínio acentuado dos teores de COT com a profundidade, acompanhado por uma redução de MOP e aumento relativo em MOAM. Em todos os casos, os horizontes superficiais concentram os maiores teores de COT, variando entre 14,09 g kg⁻¹ (P3) e 25,21 g kg⁻¹ (P8), enquanto em subsuperfície os valores caem para valores entre 5,17 g kg⁻¹ (P8-AC) e 9,53 g kg⁻¹ (P17-C/Cr).

Ao comparar os perfis das duas classes, verifica-se que os Neossolos Litólicos (P1, P6 e P10) apresentaram maior teor de carbono e maior proporção de MOP nos horizontes superficiais, com estabilização progressiva em profundidade. Já os Neossolos Regolíticos (P3, P8 e P17) mostraram menor teor superficial, mas maior proporção de MOAM desde os primeiros horizontes. Enquanto os RL sofrem um decréscimo abrupto e descontínuo na transição para o horizonte saprolítico, os RR sustentam uma transição suave do COT, apresentando pequenos incrementos ou estabilizações nas camadas mais profundas, como o aumento de 5,17 para 7,30 g kg⁻¹ no P8, ou de 5,84 para 6,94 g kg⁻¹ no P3. Destaca-se, também, que a predominância da MOAM em profundidade é maior nos RR. Nestes, a fração MOP torna-se praticamente nula, atingindo proporções residuais de 0,02 a 0,03 no perfil P3. Nos RL, a proximidade com o ambiente superficial mantém teores de MOP proporcionalmente maiores mesmo nas camadas subsuperficiais (alcançando frações de 42% no P1 e 27% no P10).

Esses resultados foram corroborados pelos espectros de FTIR, que mostraram predominância de bandas alifáticas (2970 – 2840 cm⁻¹) e carbonílicas (1740 cm⁻¹) nos horizontes superficiais, associadas a compostos lábeis de origem vegetal, e incremento das bandas aromáticas/amídicas (1565 cm⁻¹) e polissacarídicas/minerais (1250 – 1050 cm⁻¹; 1000 – 700 cm⁻¹) em profundidade, indicando maior estabilização organomineral. Entretanto, a análise do comportamento espectrográfico da MOS ao longo dos perfis de Neossolos Litólicos (P1, P6 e P10) e Regolíticos (P3, P8 e P17) reforça as diferenças estruturais entre as duas classes.

Figura 4.6 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P1 (Neossolo Litólico), sob campo sujo



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.7 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P1, em Neossolo Litólico, sob campo sujo

Horizonte	Profundidade	COT	MOAM	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 10/7	17,98	4,37	0,24	3,7	17,7	6,4	4,3	2,9	40,3	24,8
Cr1	10/7 - 22	7,27	2,48	0,34	0,0	5,0	17,4	13,3	4,9	51,7	7,6
Cr2	22 - 43/33	6,81	3,94	0,58	8,5	12,8	4,2	17,6	16,5	22,7	17,7

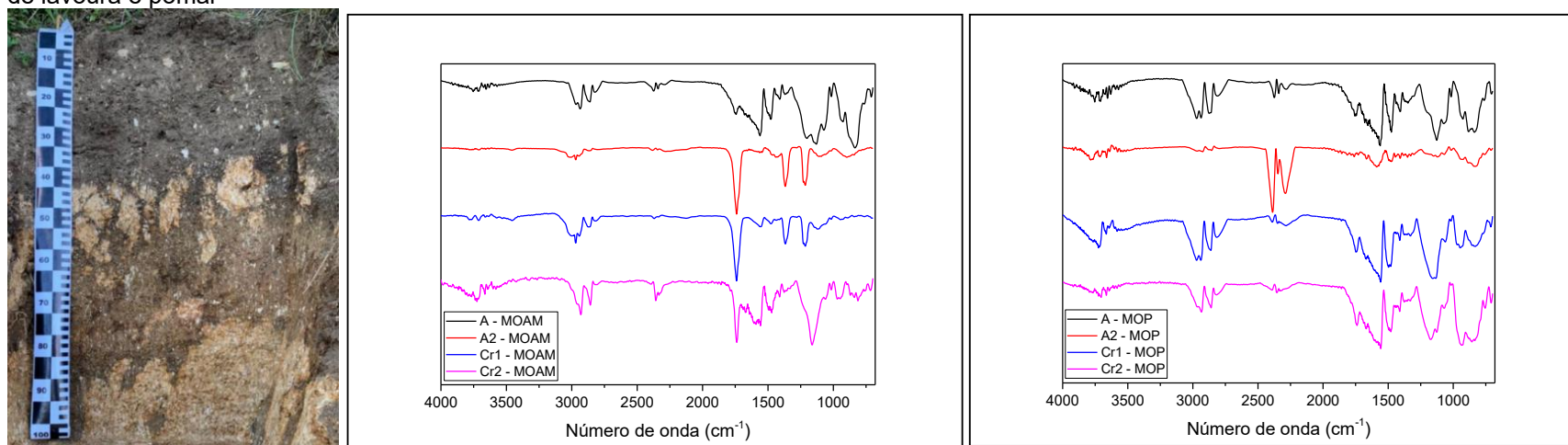
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.8 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P1, em Neossolo Litólico, sob campo sujo

Horizonte	Profundidade	COT	MOP	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 10/7	17,98	13,61	0,76	0,3	16,0	11,3	5,9	19,5	29,6	17,4
Cr1	10/7 - 22	7,27	4,79	0,66	0,5	5,4	34,5	21,8	13,3	21,1	3,3
Cr2	22 - 43/33	6,81	2,88	0,42	13,0	11,8	4,2	17,2	12,9	22,3	18,6

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4.7 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P3 (Neossolo Regolítico), sob cultivo consorciado de lavoura e pomar



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.9 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P3, em Neossolo Regolítico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar

Horizonte	Profundidade	COT	MOAM	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A1	0 - 20	14,09	5,10	0,36	6,1	8,8	6,9	16,8	7,6	24,1	29,7
A2	20 - 35/45	11,19	8,31	0,74	3,1	10,5	29,4	2,7	21,3	22,8	10,1
Cr1	35/45 - 50/58	5,84	5,73	0,98	12,7	24,6	21,9	4,9	12,1	20,0	3,8
Cr2	50/58 - 73/83	6,94	6,74	0,97	12,0	11,1	9,6	18,8	10,5	25,7	12,2

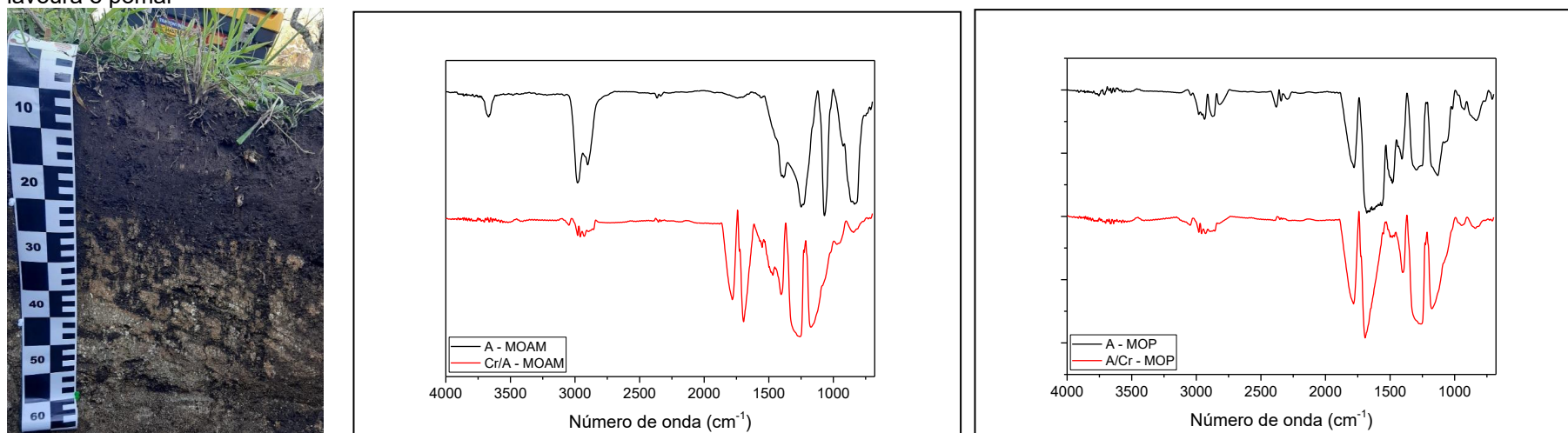
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.10 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P3, em Neossolo Regolítico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar

Horizonte	Profundidade	COT	MOP	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A1	0 - 20	14,09	8,99	0,64	10,9	15,8	6,5	17,6	11,9	18,7	18,7
A2	20 - 35/45	11,19	2,88	0,26	17,9	4,1	8,2	16,3	14,0	11,8	27,7
Cr1	35/45 - 50/58	5,84	0,11	0,02	15,9	14,7	4,7	17,5	12,4	20,5	14,3
Cr2	50/58 - 73/83	6,94	0,20	0,03	6,0	8,8	5,6	26,0	6,4	20,0	27,2

Fonte: elaborado pelo autor

FIGURA 4.8 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR dos horizontes diagnósticos do perfil P6, em Neossolo Litólico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.11 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P6, em Neossolo Litólico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar

Horizontes	Profundidade	COT	MOAM	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 20/22	14,12	6,47	0,46	2,8	18,2	1,5	0,4	14,1	37,9	25,1
Cr/A	20/22 - 35/50	8,78	6,74	0,77	0,3	3,0	24,4	2,8	14,6	49,0	5,8

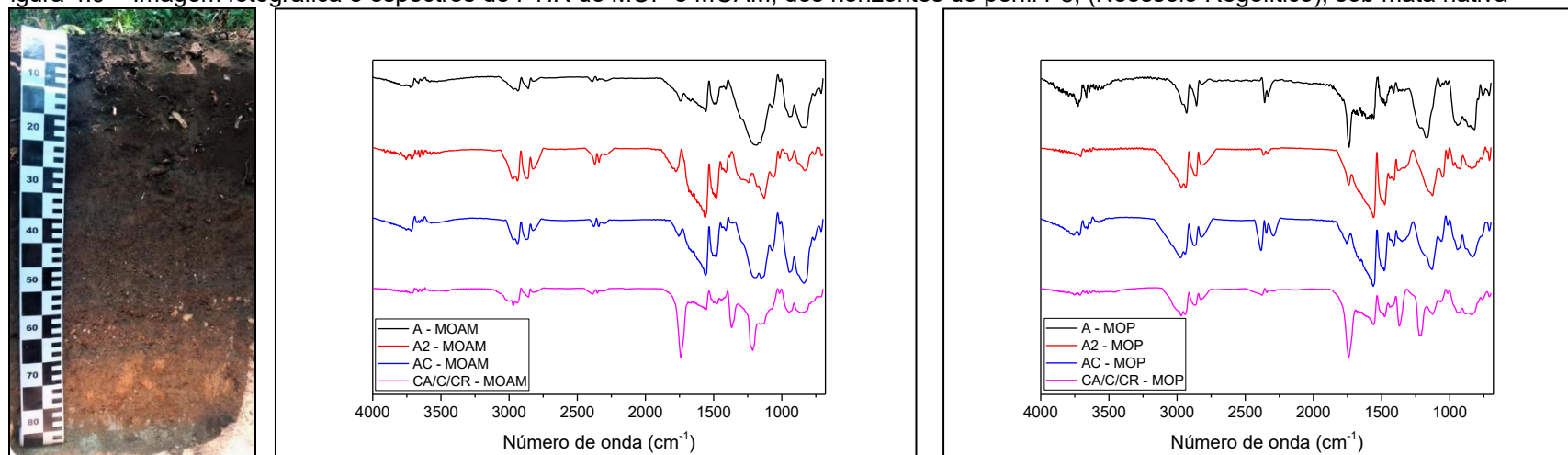
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.12 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P6, em Neossolo Litólico, sob cultivo consorciado de lavoura e pomar

Horizontes	Profundidade	COT	MOP	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 20/22	14,12	7,64	0,54	1,0	6,8	8,9	30,3	14,9	30,1	8,1
Cr/A	20/22 - 35/50	8,78	2,04	0,23	2,3	5,5	14,4	25,4	29,2	21,0	2,3

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4.9 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P8, (Neossolo Regolítico), sob mata nativa



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.13 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P8, em Neossolo Regolítico, sob mata nativa

Horizontes	Profundidade	COT	MOAM	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 20	25,21	14,68	0,58	6,6	4,9	4,6	11,3	4,9	40,8	26,9
A2	20 - 37	13,81	8,66	0,63	4,5	16,0	5,7	25,8	11,9	24,1	12,1
AC	37 - 50/58	5,17	3,89	0,75	6,8	7,6	2,2	16,3	6,9	30,6	29,6
CA/C/CR	50/58 - 75/80	7,30	6,42	0,88	1,7	8,8	17,7	7,1	11,9	32,4	20,4

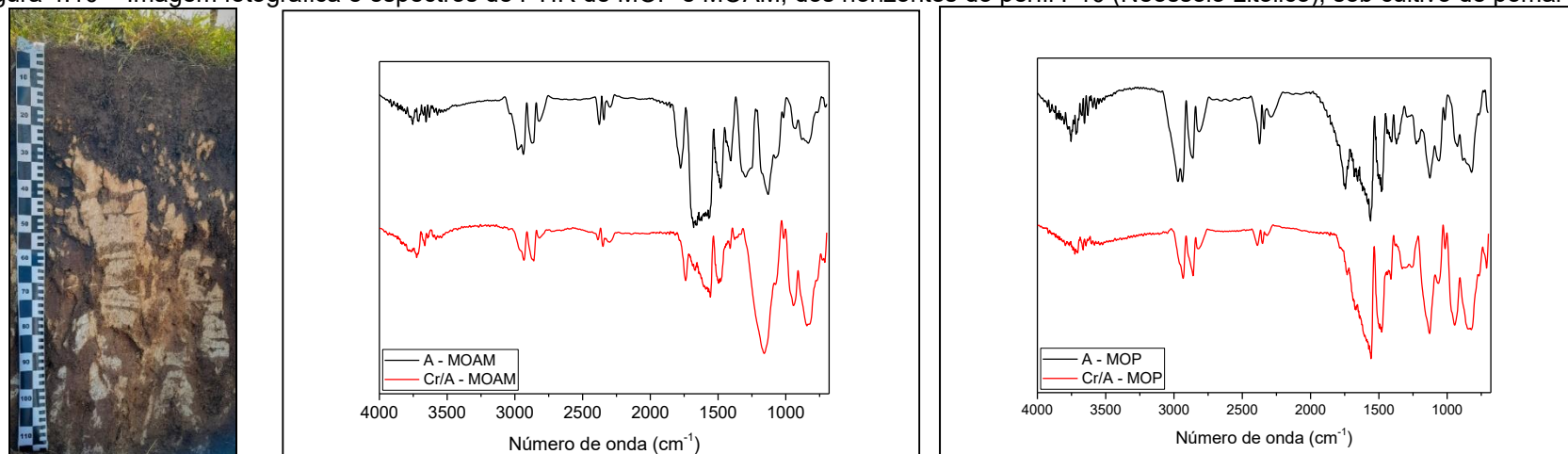
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.14 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P8, em Neossolo Regolítico, sob mata nativa

Horizontes	Profundidade	COT	MOP	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 20	25,21	10,53	0,42	13,2	8,9	15,9	10,4	8,0	20,6	23,0
A2	20 - 37	13,81	5,14	0,37	2,7	20,8	5,3	22,0	16,6	16,9	15,7
AC	37 - 50/58	5,17	1,27	0,25	7,6	19,3	3,7	20,0	15,4	16,6	17,3
CA/C/CR	50/58 - 75/80	7,30	0,87	0,12	5,2	15,4	16,6	14,3	14,5	23,6	10,5

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4.10 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P10 (Neossolo Litólico), sob cultivo de pomar



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.15 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P10, em Neossolo Litólico, sob cultivo de pomar

Horizonte	Profundidade	COT	MOAM	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 17	24,07	14,35	0,60	7,8	12,1	4,4	26,9	11,2	23,5	14,1
CrA	17 - 25/56	11,98	8,72	0,73	8,6	5,3	3,2	12,5	7,3	32,5	30,5

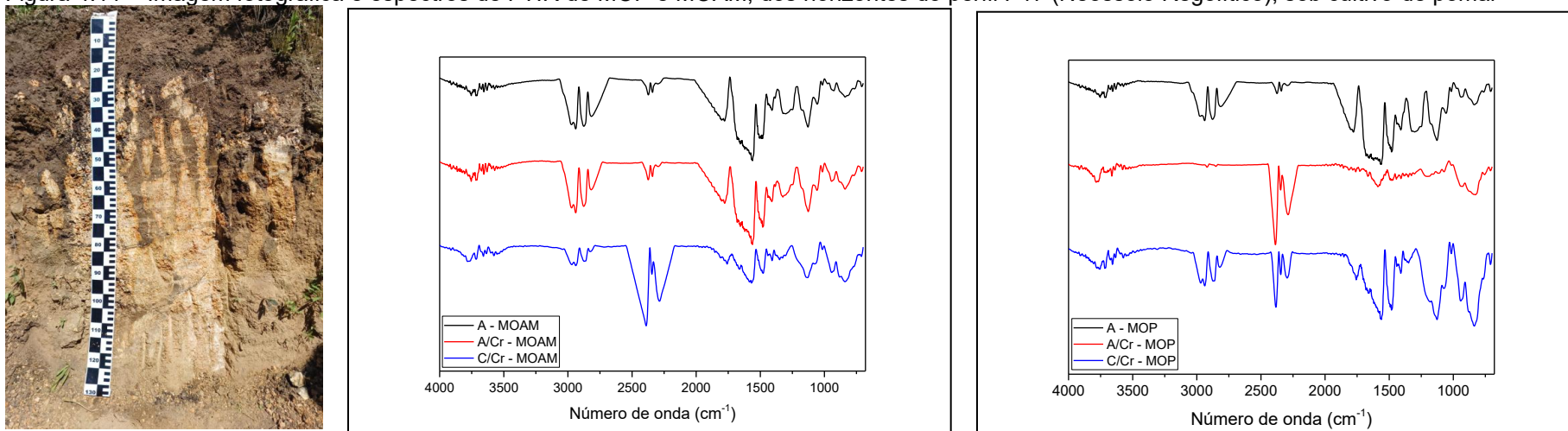
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.16 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P10, em Neossolo Litólico, sob cultivo de pomar

Horizonte	Profundidade	COT	MOP	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 17	24,07	9,72	0,40	12,8	17,9	11,9	18,9	10,5	14,2	13,9
CrA	17 - 25/56	11,98	3,26	0,27	7,8	7,5	2,6	21,1	15,9	17,9	27,2

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4.11 – Imagem fotográfica e espectros de FTIR de MOP e MOAM, dos horizontes do perfil P17 (Neossolo Regolítico), sob cultivo de pomar



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.17 – Teores de COT e MOAM (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P17, em Neossolo Regolítico, sob cultivo de pomar

Horizonte	Profundidade	COT	MOAM	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 25	17,34	14,07	0,81	6,4	21,3	13,1	23,7	12,0	16,3	7,2
A/Cr	20 - 30/35	15,19	13,89	0,91	8,1	18,4	19,7	15,2	19,2	8,7	10,8
C/Cr	30/35 - 84	9,53	8,20	0,86	13,0	8,4	5,4	16,9	12,3	17,1	27,0

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.18 – Teores de COT e MOP (g kg^{-1}) e intensidade relativa (% de área integrada) das bandas espectrais (cm^{-1}), dos horizontes do perfil P17, em Neossolo Regolítico, sob cultivo de pomar

Horizonte	Profundidade	COT	MOP	%	3700	2970 – 2840	1740	1565	1475 – 1350	1250 – 1050	1000 – 700
A	0 - 25	17,34	3,27	0,19	6,4	15,0	10,1	24,9	14,2	21,0	8,5
A/Cr	20 - 30/35	15,19	1,30	0,09	12,9	1,4	3,9	17,2	19,2	13,8	31,6
C/Cr	30/35 - 84	9,53	1,33	0,14	9,0	9,9	3,7	17,3	11,2	23,4	25,4

Fonte: elaborado pelo autor

4.3.9.1. Caracterização da MOP

Nos perfis de Neossolos Litólicos (P1, P6 e P10), a fração MOP respondeu pela maior parte do carbono nos horizontes superficiais, alcançando até 76% do COT no horizonte A do perfil P1 (Tabela 4.7). Do ponto de vista espectral, os horizontes superficiais desses solos foram caracterizados por uma forte assinatura alifática (2970–2840 cm^{-1}), registrando intensidades relativas de 16,0% no P1-A e 17,9% no P10-A (Tabela 4.16). Associado a esse caráter hidrofóbico, constatou-se uma expressiva presença de bandas de carbonilas e ésteres a 1740 cm^{-1} , que atingiram 11,3% no P1-A e 11,9% no P10-A, confirmando o predomínio de compostos lipídicos, ceras e tecidos menos transformados na superfície.

Com o incremento da profundidade nos Neossolos Litólicos, a fração MOP revelou um comportamento peculiar. Em vez de um desaparecimento completo, manteve-se quantitativamente expressiva nos horizontes saprolíticos subsuperficiais. No horizonte P1-Cr2 representou 42% do COT e 27% no P10-CrA. Nos espectros de FTIR, essa permanência foi acompanhada por uma expressiva oxidação e rearranjo molecular. No perfil P1, a transição do horizonte A para o Cr1 foi marcada por uma grande elevação na banda de carbonilas (1740 cm^{-1}), que subiu de 11,3% para 34,5%, paralela ao aumento das bandas amídicas/aromáticas a 1565 cm^{-1} de 5,9% para 21,8%). Já no horizonte mais profundo (Cr2), observou-se uma forte elevação na intensidade da banda a 3700 cm^{-1} (13,0% no P1 e 7,8% no P10) e na região de 1000–700 cm^{-1} (18,6% no P1 e 27,2% no P10).

Nos Neossolos Regolíticos (P3, P8 e P17), a dinâmica da fração MOP seguiu um modelo de exclusão vertical mais intenso. Embora na superfície esses solos sustentem teores relevantes de MOP, representando até 64% do COT no P3-A1 (lavoura/pomar – Tabela 4.10) e 42% no P8-A (mata nativa – Tabela 4.14), a participação dessa fração cai para níveis residuais ou nulos em subsuperfície. Nos horizontes Cr1 do P3 e CA/C/CR do P8, a MOP representou, respectivamente, apenas 2% e 12% do COT. Na camada superficial de áreas agrícolas, a assinatura espectral da MOP apresentou elevados teores alifáticos (15,8% no P3; 15,0% no P17) e de bandas aromáticas/amídicas a 1565

cm^{-1} , variando de 17,3% (P3) a 24,9% (P17). Na área de mata nativa esses percentuais foram relativamente menores, representando 8,9% e 10,4%, respectivamente.

A degradação da MOP ao longo do perfil regolítico fica evidente ao analisar os horizontes de transição e subsuperfície. No perfil P3, o horizonte intermediário A2 exibiu uma drástica redução do sinal alifático (caindo para 4,1%), enquanto a banda mineral na região de 1000–700 cm^{-1} aumentou para 27,7%, demonstrando o avanço rápido da mineralização da fração particulada livre. Nos horizontes saprolíticos mais profundos (Cr1 do P3 e AC do P8), onde a MOP é quantitativamente vestigial, os espectros sobreviventes são dominados de forma quase absoluta pela assinatura da matriz mineral do regolito. O perfil P3-Cr1 apresentou forte intensidade na região de polissacarídeos a 1250–1050 cm^{-1} (20,5%), enquanto o P8-AC sob mata nativa registrou 19,3% de alifáticos remanescentes altamente oxidados, operando em paralelo a um forte sinal de deformação mineral. Esse comportamento confirma que o ambiente profundo e poroso do regolito atua como uma barreira ecológica estrita para a MOP, acelerando a atividade biológica de consumo dos tecidos livres e forçando o carbono remanescente a migrar em direção à estabilização mineral na fração MOAM.

4.3.9.2. Caracterização da MOAM

Nos perfis de Neossolos Litólicos (P1, P6 e P10), os horizontes superficiais apresentaram teores de COT, relativamente, mais elevados, variando de 17,98 g kg^{-1} (P1) a 24,07 g kg^{-1} (P10). Em profundidade, esses valores caem para 6,81 g kg^{-1} (P1-Cr2) e 11,98 g kg^{-1} (P10-CrA). A fração MOAM representa inicialmente entre 24% (P1) e 60% (P10) do COT, mas aumenta para 58–73% em subsuperfície, evidenciando maior estabilização. Essa transição é reforçada pelos espectros de FTIR. No horizonte A do P1, predominam compostos alifáticos (2970 – 2840 cm^{-1} = 17,7%) e polissacarídeos (1250 – 1050 cm^{-1} = 40,3%), enquanto em Cr2 há incremento de polissacarídeos (22,7%) e minerais (1000 – 700 cm^{-1} = 17,7%). O P6 mostra comportamento semelhante, com alifáticos expressivos no horizonte superficial (2970 – 2840 cm^{-1} =

18,2%) e polissacarídeos (37,9%) e, em profundidade, polissacarídeos (CrA = 49,0%) em associação mineral (5,8%). O horizonte A do P10 apresenta forte sinal aromático ($1565\text{ cm}^{-1} = 26,9\%$) e, em CrA, há intensificação das bandas polissacarídicas (32,5%) e minerais (30,5%).

Os perfis de Neossolos Regolíticos (P3, P8 e P17) apresentaram teores superficiais de COT relativamente menores, variando de $14,09\text{ g kg}^{-1}$ (P3-A1) a $25,21\text{ g kg}^{-1}$ (P8-A). Em profundidade, os valores caem para $5,84\text{ g kg}^{-1}$ (P3-Cr1), $5,17\text{ g kg}^{-1}$ (P8-AC) e $9,53\text{ g kg}^{-1}$ (P17-C/Cr). Na fração MOAM a participação é, proporcionalmente, maior nos horizontes superficiais (36% – 81%) e alcança valores próximos à saturação em subsuperfície (86 – 98%). Essa tendência é confirmada pelos espectros de FTIR. O horizonte superficial do perfil P3 apresenta compostos aromáticos ($1565\text{ cm}^{-1} = 16,8\%$), polissacarídeos (24,1%) e minerais (29,7%) que mantêm predomínio em Cr2 ($1565 = 18,8\%$; polissacarídeos = 25,7% e minerais = 12,2%). No P17, a superfície mostra alifáticos ($2970 - 2840\text{ cm}^{-1} = 21,3\%$), aromáticos ($1565\text{ cm}^{-1} = 23,7\%$) e polissacarídeos (16,3%), enquanto em C/Cr há maior expressão das bandas aromáticas ($1565\text{ cm}^{-1} = 16,9\%$) e polissacarídeos (17,1%) e minerais ($1000 - 700\text{ cm}^{-1} = 27,0\%$). No P8, sob mata nativa, observa-se elevado teor de COT no horizonte superficial ($25,21\text{ g kg}^{-1}$) com polissacarídeos elevados (40,8%) e associação mineral (26,9%) que se mantém em CA/C/CR ($1250 = 32,4\%$ e $1000 - 700 = 20,4\%$).

4.3.10. Caracterização isotópica de Neossolos Litólicos e Regolíticos do ESRG

A análise isotópica das frações granulométricas dos perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos revelou comportamentos distintos de transformação e estabilização da MOS. Os resultados das análises isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ estão apresentados na (Tabela 4.19). Essas diferenças podem ser associadas tanto a influências da classe pedológica quanto aos diferentes usos do solo.

Nos RL, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ na fração MOAM variaram, na superfície, de $-24,62\text{‰}$ (P1-campo) a $-20,78\text{‰}$ (P6-pomar). Em profundidade constatou-se um enriquecimento em todos os perfis, com valores situando-se em uma amplitude estreita

entre -21,33‰ (P10-CR/A) e -19,23‰ (P1-Cr1). Esse enriquecimento vertical indica o efeito conjunto do fracionamento isotópico decorrente da decomposição progressiva da MOS e a provável contribuição histórica de resíduos de plantas com ciclo fotossintético C₄. Na fração MOP, os valores mais negativos na superfície (-27,09‰ no P1 a -23,63‰ no P6) confirmam a predominância de tecidos vegetais pouco transformados e predomínio de plantas C₃.

Tabela 4.19 – Resultados da análise isotópica do $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESG

Classe	Perfil	Uso do solo	Horizonte	Profundidade (cm)	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$	
					MOP	MOAM	MOP	MOAM
RL	P1	Campo	A	0 – 10/7	-27,09	-24,62	0,79	4,15
			Cr1	10/7 – 22	ND	-19,23	ND	6,09
			Cr2	22 – 43/33	ND	-19,88	ND	3,34
	P6	Pomar	A	0 – 20/22	-23,63	-20,78	3,83	7,05
			Cr/A	20/22 – 35/50	ND	-19,77	ND	6,87
	P10	Pomar	A	0 – 17	-25,57	-23,05	4,37	7,00
CR/A			17 – 25/56	-22,73	-21,33	2,93	7,10	
RR	P3	Pomar	A	0 – 20	-25,29	-22,47	0,51	5,48
			A2	20 – 35/45	-26,20	-22,49	ND	6,27
			Cr1	35/45 – 50/58	ND	-21,26	ND	4,54
			Cr2	50/58 – 73/83	-26,69	-20,02	ND	4,65
	P17	Pomar	A	0 – 20	-20,34	-20,51	1,73	5,74
			AC/CR	20 – 30/45	ND	-19,52	ND	6,18
			CR/C	30/45 – 80	ND	-20,10	ND	4,94
	P8	Mata nativa	A1	0 – 20	-26,87	-23,83	4,51	7,69
			AC	37 – 50/58	-25,88	-17,30	ND	3,97
CA/C/CR			50/58 – 75/80	ND	-20,20	ND	5,19	

Fonte: elaborado pelo autor

O comportamento do $\delta^{15}\text{N}$ na fração MOAM dos RL revelou valores superficiais elevados (4,15‰ em P1 a 7,05‰ em P6). Embora os perfis P6 e P10 tenham mantido patamares estáveis em subsuperfície (6,87‰ e 7,10‰, respectivamente), o perfil P1 exibiu um comportamento sinuoso, elevando-se para 6,09‰ no horizonte Cr1 e sofrendo acentuado empobrecimento para 3,34‰ na camada mais profunda (Cr2). Na fração MOP, os baixos valores de $\delta^{15}\text{N}$ restritos à superfície (0,79‰ a 4,37‰)

corroboram o caráter lábil e a menor assinatura de transformação microbiológica dessa fração.

Nos RR, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em MOAM foram menos negativos já na superfície (-23,83‰ no P8 a -20,51‰ no P17), refletindo a diversidade de aportes entre a mata nativa e as áreas cultivadas. Em profundidade, observou-se um enriquecimento inicial rápido nos horizontes intermediários, atingindo a máxima de -17,30‰ no horizonte AC do perfil P8. Entretanto, as camadas saprolíticas mais profundas demonstraram uma tendência de estabilização ou leve empobrecimento, fixando-se em torno de -20,02‰ (P3-Cr2) e -20,20‰ (P8-CA/C/CR).

A fração MOP dos RR, ao contrário do observado nos RL, não apresentou uma dominância de plantas C_3 . Enquanto os perfis P3 e P8 registraram assinaturas tipicamente C_3 na superfície (-25,29‰ e -26,87‰), o perfil P17 sob pomar exibiu um $\delta^{13}\text{C}$ de -20,34‰, caracterizando aporte de vegetação C_4 .

O $\delta^{15}\text{N}$ em MOAM apresentou valores elevados desde os horizontes superficiais dos RR (5,48‰ a 7,69‰). Em subsuperfície, ocorreu redução nos horizontes intermediários ou profundos, com amplitudes finais entre 3,97‰ (P8-AC) a 5,19‰ (P8-CA/C/CR), sugerindo alta mineralização e fracionamento isotópico precoce. Em MOP, os valores baixos em superfície (0,51‰ a 4,51‰) e a ausência de dados determináveis (ND) na maior parte dos horizontes subsuperficiais sugerem a decomposição completa dos tecidos vegetais livres nas porções mais profundas do perfil.

4.3.11. Caracterização isotópica nos diferentes usos do solo

Nos RL, a comparação entre áreas de campo e cultivos agrícolas revela diferenças importantes na dinâmica da matéria orgânica. No P1 (campo sujo, antigo pomar de pêsseso), os valores isotópicos em MOP superficial ($\delta^{13}\text{C}$ = -27,09‰; $\delta^{15}\text{N}$ = 0,79‰) refletem aporte recente de vegetação C_3 pouco transformada, coerente com a cobertura herbácea atual. Em MOAM do mesmo horizonte, o $\delta^{13}\text{C}$ foi de -24,62‰ e o $\delta^{15}\text{N}$ de 4,15‰ com enriquecimento isotópico em profundidade do $\delta^{13}\text{C}$ para patamares

próximos a -19‰, acompanhado por uma oscilação no $\delta^{15}\text{N}$ que se eleva no horizonte Cr1 (6,09‰) e recua na camada Cr2 (3,34‰).

Nos perfis cultivados com pomares (P6 e P10), as assinaturas superficiais demonstraram maior variação biótica. A fração MOP do P10 apresentou um $\delta^{13}\text{C}$ de -25,57‰ e em P6 um valor relativamente maior (-23,63‰), comportamento que se refletiu na fração MOAM. Embora a fração MOP do P10 conserve forte domínio de fontes C_3 (90%), o perfil P6 revelou uma inserção de 24% de material derivado de plantas C_4 na fração particulada livre (Figura 4.12 e Tabela 4.20). Na fração MOAM, ambos os pomares exibiram acentuado incremento na contribuição de carbono C_4 , atingindo 28% no P10 e 44% no P6. Em subsuperfície, observa-se enriquecimento isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ de -21,33‰ (P10-CrA) a -19,77‰ (P6-CrA) e $\delta^{15}\text{N} \approx 7\text{‰}$.

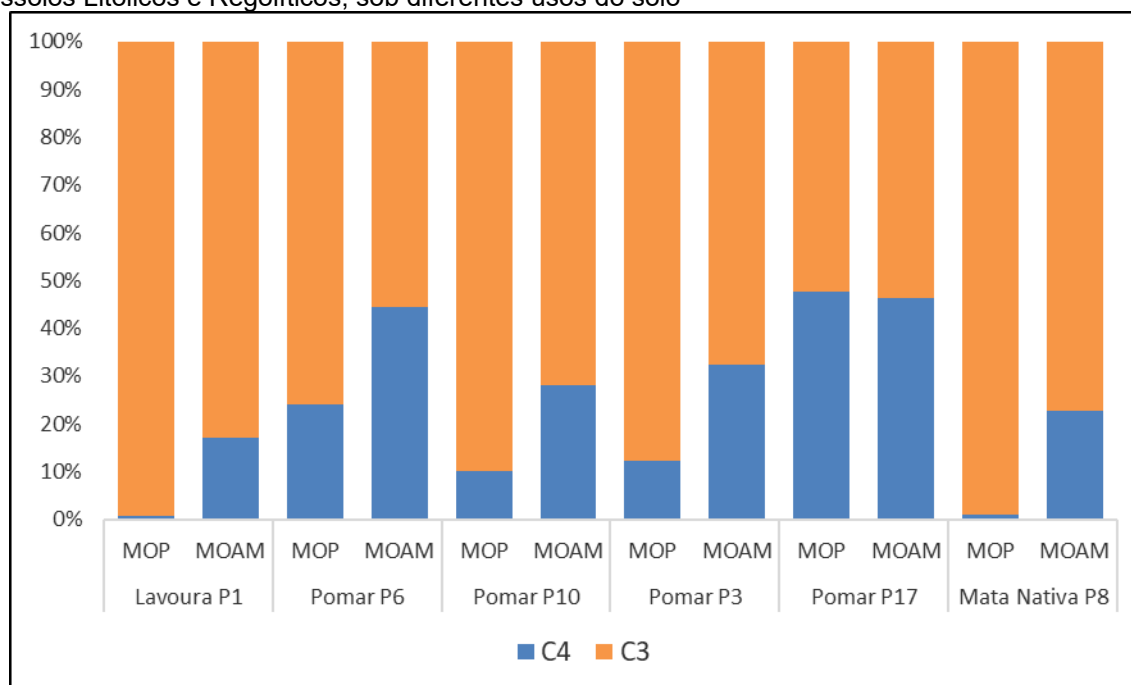
Nos RR, os contrastes induzidos pelo uso do solo foram ainda mais pronunciados. No P8 (mata nativa), os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em MOP (-26,87‰; $f\text{C}_3=99\%$) e $\delta^{15}\text{N}$ (4,51‰) caracterizam aporte típico de vegetação C_3 , preservando a assinatura isotópica da vegetação florestal. Em contrapartida, a fração MOAM superficial evidenciou mistura de fontes, registrando 23% de carbono C_4 . Em MOAM, entretanto, há enriquecimento abrupto de $\delta^{13}\text{C}$ de -23,83‰ na superfície, até -17,30‰ no horizonte AC, com recuo para -20,20‰ no horizonte saprolítico CA/C/CR. Essa tendência foi inversa no $\delta^{15}\text{N}$ com decréscimo de 7,69‰ na superfície para amplitudes entre 3,97‰ e 5,19‰ nas camadas subsuperficiais.

Nos pomares (P3 e P17), os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em MOP superficial revelaram cenários distintos de manejo. Enquanto o perfil P3 (-25,29‰) refletiu aporte recente de vegetação C_3 (88%), o perfil P17 (-20,34‰) indicou uma co-dominância biótica com 48% de contribuição C_4 , provavelmente associada ao manejo de gramíneas nas entrelinhas. Em MOAM, os valores menos negativos em superfície (-22,47‰ a -20,51‰) e o enriquecimento em profundidade (até -19,52‰ em AC/CR) revelam contribuição de gramíneas C_4 antigas e estabilização organomineral precoce em ambos os perfis. O $\delta^{15}\text{N}$ elevado já em superfície ($\approx 5\text{‰}$ a 6‰) confirma mineralização intensa, coerente com ambientes cultivados. Assim, enquanto a mata nativa conserva a assinatura isotópica típica de vegetação C_3 , os pomares apresentam sinais mistos de

C₃ e C₄, refletindo tanto o aporte agrícola atual quanto a memória isotópica de formações campestres pretéritas.

Na análise integrada da Figura 4.12 e da Tabela 4.20, observa-se que, para a maioria dos perfis avaliados, a fração MOAM atua como o principal reservatório de retenção de carbono C₄ em relação à MOP (17% no P1; 44% no P6; 28% no P10; 32% no P3; 23% no P8). O perfil P17, contudo, estabeleceu uma exceção a essa tendência ao registrar equivalência entre os compartimentos (48% de C₄ na MOP e 46% na MOAM), indicando um cenário de saturação ou de aporte recente de biomassa C₄ que superou temporariamente a capacidade de armazenamento mineral. Esse padrão indica que, embora o aporte superficial seja dominado por vegetação C₃, o carbono proveniente de vegetação C₄ tende a ser mais eficientemente estabilizado nas associações organominerais de subsuperfície.

Figura 4.12 – Proporção de carbono C₃ e C₄ nas frações MOP e MOAM, nos horizontes superficiais de Neossolos Litólicos e Rególicos, sob diferentes usos do solo



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.20 – Teores (%) relativos de vegetação C₃ e C₄ nas frações físicas da matéria orgânica de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR)

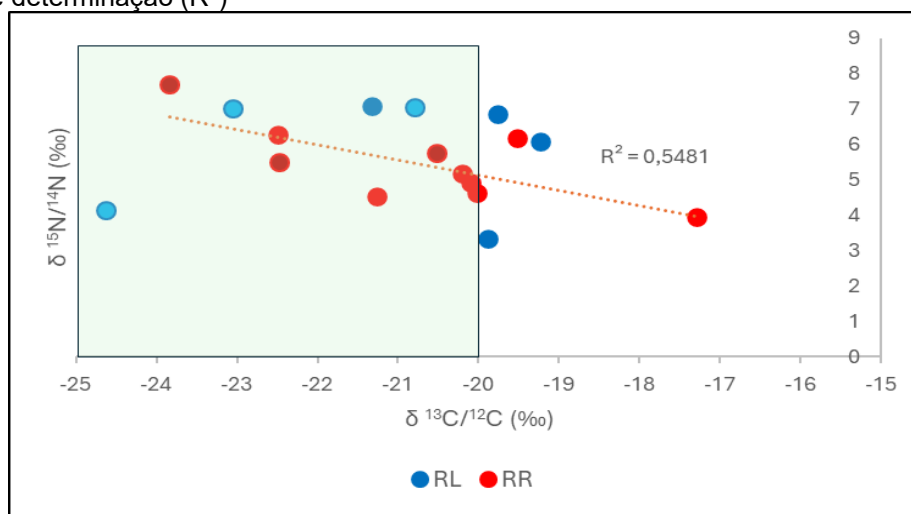
Classe	Perfis	Uso do solo	MOP		MOAM	
			f C ₄	f C ₃	f C ₄	f C ₃
RL	P1	Campo	1%	99%	17%	83%
	P6	Pomar	24%	76%	44%	56%
	P10	Pomar	10%	90%	28%	72%
RR	P3	Pomar	12%	88%	32%	68%
	P17	Pomar	48%	52%	46%	54%
	P8	Mata Nativa	1%	99%	23%	77%

Fonte: elaborado pelo autor

A dispersão bivariada entre $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (Figura 4.13) revelou um padrão de distribuição que discrimina os estágios de evolução molecular da MOS e o histórico de aporte biótico nas duas classes de Neossolos. Nos RR, observou-se uma correlação negativa, forte e significativa ($r = -0,74$; $p = 0,014$), com coeficiente de determinação (R^2) de 0,5481. Essa relação demonstra que à medida que o $\delta^{13}\text{C}$ se torna menos negativo (indicando o avanço em direção ao domínio de contribuição de plantas C₄), os valores $\delta^{15}\text{N}$ tendem a diminuir (caem de 7‰ para 4‰). Destaca-se, também, que valores mais negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (-20‰ a -25‰), que indicam predominância de plantas C₃, foram associados a valores mais altos de $\delta^{15}\text{N}$, com patamares entre 6‰ e 8‰. Nos RL, as camadas saprolíticas, e nos RR, os horizontes subsuperficiais de P8 (AC) e P17 (AC/CR), posicionam-se em áreas de mistura, sugerindo transição isotópica entre fontes C₃ e C₄.

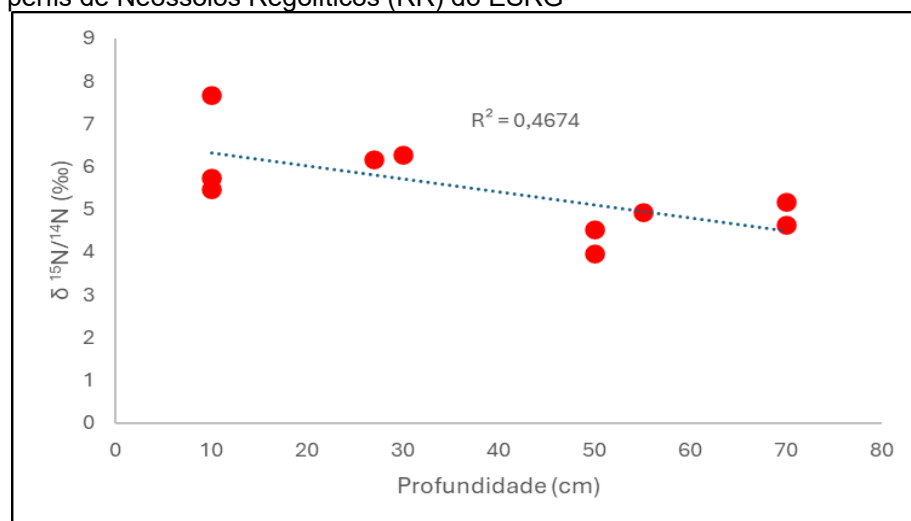
A análise da distribuição vertical do $\delta^{15}\text{N}$ nos Neossolos Regolíticos (Figura 4.14) revelou uma tendência linear negativa e estatisticamente significativa, em relação a profundidade ($R^2 = 0,4674$; $p = 0,0252$). Este resultado indica um gradiente de decréscimo moderado nos valores de $\delta^{15}\text{N}$, à medida que se avança em direção às camadas mais profundas do regolito, variando de máximas próximas a 8‰ na superfície (20 cm) para valores entre 4‰ e 5‰ nas camadas inferiores (50 a 70 cm).

Figura 4.13 – Dispersão bivariada de pontos da relação $\delta^{13}\text{C}$ vs. $\delta^{15}\text{N}$, na fração MOAM de perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG. Ajuste de linha de regressão para perfis RR, com coeficiente de determinação (R^2)



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4.14 – Regressão linear entre os valores de $\delta^{15}\text{N}$ e a profundidade (cm), na fração MOAM de horizontes de perfis de Neossolos Regolíticos (RR) do ESRG



Fonte: elaborado pelo autor

4.4. Discussão

A porosidade consolidou-se como o elemento central na evolução dos Neossolos, estabelecendo funções físicas e ecológicas distintas entre as duas classes

avaliadas. A estrutura de poros afeta diretamente as propriedades hidráulicas que impulsionam as funções do solo. Reduções na porosidade podem limitar a penetração radicular, dificultar a infiltração e reduzir a disponibilidade hídrica para as plantas (Hu *et al.*, 2023). A estrutura física condiciona como os organismos se relacionam e, por sua vez, é continuamente remodelada por essas interações (Erktan; Or; Scheu, 2020).

Os testes de comparação evidenciaram que a distribuição entre macro e microporos é o atributo físico mais relevante para discriminar RL e RR, uma vez que a densidade do solo (D_s) não apresentou diferenças estatísticas significativas (Apêndice C). Enquanto os RR foram caracterizados por uma maior macroporosidade (Ma), os RL exibiram predomínio de microporosidade (Mi). A análise de componentes principais (ACP) confirmou esse padrão ao separar os RL, associados a microporosidade e compostos mais estáveis, dos RR, vinculados à macroporosidade e resíduos frescos. Essa divergência na porosidade atua como controle biofísico primário das rotas de estabilização da MOS. A porosidade constituiria, portanto, a memória física do tipo de vegetação e do uso predominante do solo, em função de que a decomposição de raízes deixa poros contínuos e estáveis, que aumentam a infiltração e as trocas gasosas (Reichert; Reinert; Braida, 2003). As diferentes arquiteturas radiculares criam uma variedade de microambientes que sustentam comunidades microbianas diversas e funcionais (Lange *et al.*, 2015), desencadeando rapidamente a formação de bioporos em tempos dependente da densidade radicular e do manejo (Lucas *et al.*, 2019).

A maior macroporosidade dos RR reflete a ação de sistemas radiculares profundos e diversificados, que favoreceram a conectividade hídrica e biológica. Nos RL, a microporosidade predominante, pode representar características herdadas de ambientes campestres mais áridos, onde a restrição difusiva favorece a retenção seletiva de compostos hidrofóbicos. Essa interpretação reforça que as diferenças na porosidade não apenas condicionam a persistência atual da MOS, mas também preservariam a memória das trajetórias paleovegetacionais que moldaram o bioma Pampa.

Nos RR, a maior proporção de macroporos reflete uma matriz edáfica mais aerada e conectada, ambiente favorável à dinâmica hídrica e à atividade biológica.

Esse desenvolvimento estrutural seria impulsionado pela diversidade e profundidade dos sistemas radiculares em ambientes conservados, como em matas nativas (P8, P9, P12, P13). Nesses perfis os elevados valores do índice de aromaticidade na fração MOAM (I_{Ar} entre 0,51 – 0,84) confirmam que a macroporosidade (0,21 – 0,28 m³ m⁻³) sustentou uma intensa transformação bioquímica e condensação aromática da MOS. Isto evidencia que, em ambientes aerados, os compostos alifáticos lábeis da MOP são rapidamente oxidados e consumidos pela microbiota. Consequentemente, ocorre a estabilização seletiva de estruturas aromáticas funcionalizadas na matriz mineral. Esses valores reforçam que a macroporosidade não apenas favorece a entrada de carbono lábil, mas também sustenta processos de estabilização avançada em ambientes florestais. A redução acentuada do I_{nH} na MOAM da maioria dos perfis RR corrobora essa hipótese, demonstrando uma fração mineral mais hidrofílica e enriquecida em grupos funcionais oxigenados (carboxilas).

O valor discrepante de I_{nH} observado na MOAM do perfil P14 (I_{nH} = 21,50), cultivado com soja, destaca como o uso agrícola intensivo e a dinâmica de culturas específicas podem se sobrepor às propriedades da classe dos Neossolos Regolíticos. A magnitude desse índice na MOAM indica que, mesmo em um ambiente predominantemente macroporoso e aerado, houve um grande acúmulo de cadeias alifáticas hidrofóbicas fortemente associadas à fração mineral. Esse fenômeno pode ser atribuído à elevada deposição de compostos lipídicos e ceras cuticulares derivados tanto dos resíduos da parte aérea quanto da exsudação e decomposição do sistema radicular da soja. Adicionalmente, em sistemas de cultivo de grãos, a aplicação recorrente de compostos orgânicos sintéticos hidrofóbicos (como defensivos agrícolas) ou a preservação de palhada de culturas de cobertura antecedentes ricas em compostos alifáticos lineares podem promover uma saturação local da matriz mineral. Essa cobertura alifática cria uma barreira hidrofóbica ao redor dos agregados minerais, que restringe o acesso enzimático e simula os efeitos de persistência biogeoquímica por exclusão física observados nos solos microporosos (RL).

Em contrapartida, os RL caracterizam-se pelo predomínio de microporos, criando condições de restrição difusiva ao oxigênio e à água, limitando a atividade enzimática

microbiana. Esse bloqueio físico justifica o decréscimo drástico da aromaticidade (I_{Ar}) aliado ao aumento exponencial da hidrofobicidade (I_{nH}) na fração MOAM de perfis como o P6 (I_{Ar} = 0,02; I_{nH} = 12,13). Sob condições de hipoxia local nos microporos, as cadeias alifáticas hidrofóbicas lineares (como ceras, cutinas e polímeros lipídicos da vegetação) tornam-se desfavoráveis para a decomposição microbiana, acumulando-se e preservando-se de forma intacta na matriz mineral. Por outro lado, a inversão desse comportamento observada nos pomares sob solos RL (P7, P10 e P15) indica que o manejo agrícola perene altera a dinâmica de incorporação da MOS. O aumento do I_{Ar} na MOAM desses perfis sugere que as perturbações pontuais do sistema radicular das frutíferas ou o aporte contínuo de resíduos lignificados promovem a estabilização de compostos mais aromáticos na fração mineral. Esse fenômeno demonstra que, embora a barreira microporosa dos solos RL exerça forte controle sobre a preservação de alifáticos, a natureza do aporte vegetal associada ao manejo pode redirecionar os caminhos da estabilização e os mecanismos de sorção mineral.

O equilíbrio dessas interações físicas e biológicas é continuamente remodelado pelo uso do solo, manifestando-se como separação vertical na CP2 das análises multivariadas. Em solos nativos, a conectividade e abundância de macroporos são superiores às de solos agrícolas (Bhattacharyya *et al.*, 2021), pois a conversão dessas áreas para cultivos reduz significativamente a porosidade total (Locatelli *et al.*, 2023). Nos Neossolos Litólicos, sob sistemas intensivos de lavoura e revolvimento (como P2 e P6), ocorre a redução da macroporosidade e rearranjo da matriz porosa em direção ao limite crítico de aeração ($\approx 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), comprometendo a condutividade hidráulica e gerando zonas de compactação (Reinert; Gubiani, 2023). Essas evidências confirmam que os Neossolos de menor qualidade física tornam-se biologicamente menos funcionais. Como preconizado por Hartmann e Six (2023), o manejo conservacionista, com aporte contínuo de resíduos e ausência de revolvimento é imperativo no bioma Pampa, pois preserva o arranjo poroso original. Nos RR, isso significa manter a macroagregação e a estabilização aromática; nos RL, conservar a microporosidade e a retenção hidrofóbica. Essa complementaridade garante microbiomas funcionais e a sustentabilidade dos estoques de carbono a longo prazo.

4.4.1. Assinatura espectroscópica e sensibilidade das frações físicas

Os resultados de FTIR demonstraram que a MOP é mais sensível às diferenças de classe e uso do solo, funcionando como indicador precoce da qualidade da MOS. A MOAM, ao contrário, revela padrões mais estáveis. Nas bandas de estiramento C–H alifático ($2970 - 2840\text{ cm}^{-1}$) e de polissacarídeos associados a minerais ($1000 - 700\text{ cm}^{-1}$) os RL apresentaram maior acúmulo de compostos hidrofóbicos persistentes (como lipídios e ceras), enquanto os RR concentraram polissacarídeos frescos e lábeis, mais suscetíveis à mineralização ($1250\text{-}1050\text{ cm}^{-1}$). Resultados semelhantes foram descritos por Calderón *et al.* (2011) e Fultz *et al.*, (2014) que identificaram bandas alifáticas e polissacarídicas como indicadores de labilidade e rápida decomposição em frações particuladas da MOS, confirmando a maior sensibilidade da MOP às mudanças de uso do solo.

Esses indicadores reforçam a utilidade da espectroscopia como ferramenta de monitoramento da qualidade química da MOS, em consonância com a abordagem de Calderón *et al.* (2011), que destacaram a FTIR como capaz de distinguir frações da MOS e identificar indicadores de qualidade do carbono.

Na fração MOAM, a composição química mostrou-se mais homogênea entre RL e RR, sugerindo que a proteção organomineral tende a reduzir as diferenças entre classes de solo. Contudo, a banda de compostos alifáticos/lipídicos ($2970 - 2840\text{ cm}^{-1}$) destacou-se como exceção, apresentando diferenças altamente significativas e efeito de grande magnitude. Esse resultado indica que, mesmo na fração mais estável da MOS, há distinções relevantes na incorporação de lipídios e ceras, o que pode refletir tanto a posição no relevo quanto o histórico de uso agrícola.

Além disso, os índices espectroscópicos mostraram-se sensíveis aos diferentes usos do solo. O índice de hidrofobicidade (InH) foi elevado em sistemas conservados, indicando enriquecimento em compostos hidrofóbicos, enquanto o índice de aromaticidade (IAr) aumentou em áreas de cultivo intensivo, refletindo decomposição acelerada de alifáticos e enriquecimento relativo em ligninas e polifenóis. Esse padrão é consistente com os achados de Artz *et al.* (2008), que observaram aumento relativo de

bandas aromáticas como indicador de maior persistência da MOS, associada à acumulação de compostos aromáticos e à proteção conferida pela estrutura do solo.

Essa diferenciação espectroscópica entre as frações estabelece um elo direto com a análise isotópica, uma vez que os padrões de enriquecimento em ^{13}C e ^{15}N também refletem a interação entre aporte recente e estabilização mineral. Assim, enquanto o FTIR evidencia contrastes moleculares nas bandas funcionais, a análise isotópica traduz esses processos em termos da origem das plantas (C_3 e C_4) e da intensidade da decomposição.

4.4.2. Arquivos isotópicos e evolução paleoambiental no Bioma Pampa

Nos RL e RR o enriquecimento isotópico em $\delta^{13}\text{C}$ não se manifesta de forma homogênea. A análise integrada das assinaturas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ permitem interpretar que os Neossolos Regolíticos seriam produtos da evolução pedológica ativa impulsionada pela expansão florestal durante o Holoceno. Em contraste os Neossolos Litólicos, representariam relictos de condições mais secas e frias do Quaternário Tardio.

Na camada superficial, a fração MOP manteve a predominância de plantas C_3 (76–99%), enquanto a fração MOAM registrou maior enriquecimento isotópico, com a contribuição de plantas C_4 variando de 17% a 44% nos RL e de 23% a 46% nos RR (Tabela 4.19), confirmando que a estabilização mineral atua como um seletor isotópico crônico (Wynn, 2007; Philben *et al.*, 2022). A ocorrência de MOP em profundidades maiores, como no horizonte CR2 do pomar P3 (RR), sugere que a contribuição radicular pode desempenhar papel relevante na manutenção de carbono particulado em camadas mais profundas. Philben *et al.* (2022) demonstraram que o carbono das raízes é sistematicamente mais enriquecido em ^{13}C em relação às folhas e musgos, e que esse aporte pode ser transferido verticalmente, contribuindo para o enriquecimento isotópico dos horizontes orgânicos. No perfil P3, a presença de MOP com $\delta^{13}\text{C} = -26,69\text{‰}$ em CR2 indica que resíduos radiculares ou fluxos associados à rizosfera podem ter favorecido a deposição de carbono fresco em profundidade. Contudo, tal

mecanismo explica apenas parte da variabilidade, já que Philben *et al.* (2022) mostraram que a biomassa radicular responde por cerca de 20% do gradiente isotópico com a profundidade, sendo insuficiente para justificar toda a magnitude observada. Assim, no caso dos Neossolos Regolíticos, a maior macroporosidade não apenas facilita a penetração radicular, mas também cria condições para a redistribuição organomineral e a estabilização parcial da MOS em profundidade. Em contraste, nos Litólicos, a microporosidade elevada restringe esse aporte, reforçando sua interpretação como relictos de paisagens campestres, onde a MOP tende a se concentrar em horizontes mais superficiais.

Os resultados obtidos para os RL e RR evidenciam que, na camada superficial, a fração MOP mantém predominância de plantas C₃ (76–99%), enquanto a fração MOAM apresenta maior enriquecimento isotópico, com contribuição de plantas C₄ variando entre 17% e 44% nos Litólicos e entre 23% e 46% nos Regolíticos. Esse padrão confirma que o fracionamento isotópico durante a decomposição da matéria orgânica é um processo-chave, como discutido por Wynn (2007), que demonstrou o enriquecimento em ¹³C do carbono residual em função da mineralização. A revisão de Krüger *et al.* (2024) reforça que gradientes de profundidade e processos de estabilização mineral modulam esse enriquecimento, sendo mais acentuado em solos rasos e com menor capacidade de retenção hídrica, como os RL.

Nos RL, solos mais rasos e com menor capacidade de retenção hídrica superficial (Barbosa, 2022) sofrem maior déficit hídrico sazonal, amplificando o efeito de fracionamento isotópico ($\delta^{13}\text{C} \approx -19\text{‰}$ a -21‰ na MOAM), tendência regional documentada em escala climática por Stein *et al.* (2021). Nos RR, mais profundos e com maior capacidade de acumular água, a pluviosidade é mais eficaz em manter condições úmidas, preservando assinaturas mais depletadas ($\delta^{13}\text{C} \approx -25\text{‰}$ a -26‰), compatíveis com a predominância de plantas C₃. Em RL, a baixa retenção hídrica intensifica o efeito de déficit, enquanto nos RR a maior profundidade e estabilização mineral amortecem esse impacto. Essa interação entre clima e atributos físicos do solo reforça que os Neossolos funcionam como sistemas sensíveis às variações ambientais, registrando tanto a dinâmica atual quanto a memória isotópica da vegetação pretérita

O aumento da fração C₄ na MOAM dos perfis RL, P1 (campo) e P6 (pomar), (17% e 44%, respectivamente) reflete o legado do uso agrícola sobre a origem da MOS, com incorporação de resíduos isotopicamente mais enriquecidos em ¹³C. Essa tendência é coerente com o padrão descrito por Boutton *et al.* (1993) e Biedenbender *et al.* (2004), que demonstraram o aumento da contribuição de carbono C₄ em solos sob uso agrícola ou pastagens dominadas por gramíneas C₄. Em áreas de pomares, perfis P10 (RL) e P3 (RR), a diferença entre MOP e MOAM é mais sutil, mas ainda indica enriquecimento isotópico na fração mineral, sugerindo que parte do carbono C₄ incorporado em períodos anteriores foi preservado por mecanismos de adsorção e complexação com óxidos e argilas. Já o pomar P17 (RR) estabeleceu uma exceção ao registrar equivalência de C₄ em ambas as frações ($\approx 48\%$ e 46%), evidenciando um sistema em equilíbrio isotópico entre fontes C₃ e C₄, possivelmente resultado de sucessivos cultivos mistos e aporte de resíduos com diferentes assinaturas isotópicas.

Nos Neossolos Regolíticos, as variações de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ ao longo dos perfis registram a transição paleovegetacional do Pampa. A interpretação integrada dos perfis P8 (mata nativa), P3 e P17 (pomares) sugere que essas áreas, atualmente sob vegetação arbórea ou cultivada, foram originalmente cobertas por campos de gramíneas C₄, posteriormente sucedidos por florestas C₃ em resposta às mudanças climáticas ocorridas em altas latitudes do sul do Brasil durante o Quaternário tardio (Behling, 2002; Pessenda *et al.*, 2009).

No perfil P8 (mata nativa), o valor de $\delta^{13}\text{C}$ de $-17,30\text{‰}$, observado em profundidade (horizonte AC), constitui uma evidência dessa mistura de fontes. O sinal da paleovegetação campestre C₄ foi preservado nas camadas profundas do regolito e sobreposto pelo fracionamento associado à decomposição prolongada (Boutton, 1996; Krüger *et al.*, 2024; O'Leary, 1988; Wynn, 2007). Assim, o $\delta^{13}\text{C}$ menos negativo em profundidade deve ser interpretado como resultado da sobreposição entre processos de decomposição e memória isotópica de antigas formações campestres. Isto corrobora a hipótese de que, durante períodos climáticos mais frios e secos do Quaternário tardio, o RS foi dominado por campos de gramíneas C₄, que, posteriormente, deram lugar à Floresta Atlântica com o aumento da umidade e da temperatura. Essa transição,

amplamente documentada em registros palinológicos e isotópicos (Behling, 2002; Pessenda *et al.*, 2009), reflete uma reorganização da paisagem impulsionada por mudanças paleoclimáticas regionais. Assim, os Neossolos Regolíticos atuam como arquivos isotópicos, preservando em suas camadas profundas o sinal da vegetação ancestral, registrando a substituição gradual dos sistemas campestres C₄ por formações florestais C₃. Resultados semelhantes a este foram registrados por Botelho (2011) que mostram, em diversos perfis avaliados no ESRG, evidências de mudanças paleovegetacionais. Dentre eles destacam-se perfis de Neossolos Regolíticos onde valores isotópicos de ¹³C corroboram a interpretação de que estes solos registram em sua matéria orgânica a chegada recente das florestas nesta região. Em perfil sob mata nativa, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ variaram significativamente em profundidade, passando de -22,30‰ no horizonte A1 até -14,56‰ no horizonte AC/CR. Essa tendência indica uma transição isotópica campo–floresta, em que os horizontes superficiais refletem o predomínio de plantas C₃ associadas à cobertura florestal recente, enquanto os horizontes mais profundos preservam a assinatura isotópica de gramíneas C₄, típicas dos antigos campos quaternários. Em RR sob pomar, Botelho (2011), também, registrou valores isotópicos que confirmam a presença de vegetação C₄ em profundidade, reforçando a memória dos campos pretéritos mesmo sob áreas de cultivos atuais. Além dos Neossolos, Argissolos e Luvisolos também apresentaram horizontes subsuperficiais com mistura isotópica C₃/C₄, evidenciando que diferentes classes de solos funcionam como registros da transição paleoclimática entre campos e florestas no RS.

Os resultados isotópicos obtidos nos Neossolos do ESRG convergem com os achados de Andriollo *et al.* (2017), que analisaram toposequências floresta-campo no bioma Pampa utilizando razões ¹³C/¹²C. Os autores destacam que a transição entre floresta e campo fica registrada de forma nítida na MOS, confirmando que os isótopos de carbono são indicadores robustos da história da vegetação e da gênese diferenciada dos Neossolos. Assim como nos perfis de Neossolos do ESRG, os autores observaram valores mais negativos em solos sob floresta, característicos da predominância de plantas C₃, enquanto áreas de campo apresentaram valores menos negativos,

refletindo maior contribuição de gramíneas C₄. Essa diferenciação isotópica reforça a interpretação de que os Neossolos Regolíticos representariam ambientes colonizados pela expansão florestal em maiores latitudes no RS, ao passo que os Neossolos Litólicos preservariam a assinatura de antigos campos.

4.5. Conclusões

Os Neossolos Litólicos apresentam, em média, maior microporosidade e os Neossolos Regolíticos maior macroporosidade. Essa diferença estrutural significativa confirma a hipótese inicial, indicando que a porosidade exerce uma função primária na forma como cada classe de solo regula a persistência da MOS.

A predominância de microporos nos RL estabelece uma barreira física de restrição difusiva ao oxigênio e à água que favorece a retenção seletiva de compostos hidrofóbicos e lipídicos. Os Neossolos Regolíticos apresentam maior proporção de macroporos que promove conectividade hídrica e biológica, favorecendo a entrada de polissacarídeos frescos e a atividade microbiana.

A fração MOP mostra-se mais sensível aos usos e às classes de solo, refletindo rapidamente mudanças no aporte vegetal e na decomposição. A fração MOAM, embora mais estável, evidencia contrastes relevantes em compostos alifáticos e índices estruturais, confirmando que a estabilização mineral atua como seletor isotópico e preserva resíduos mais antigos e recalcitrantes.

Os índices de hidrofobicidade (InH) e aromaticidade (IAr) funcionam como indicadores sensíveis para o monitoramento da qualidade da MOS. O InH é elevado em sistemas conservados, refletindo acúmulo de compostos alifáticos hidrofóbicos. O IAr é maior em áreas agrícolas intensivas, indicando decomposição acelerada de alifáticos e enriquecimento relativo em estruturas aromáticas complexas, cenário refletido na maior variabilidade estrutural dos RL frente à homogeneidade dos RR.

A MOP registra aporte recente de vegetação C₃, enquanto a MOAM concentra carbono mais enriquecido em ¹³C, com maior proporção de C₄. Embora a fração MOP

tenda a concentrar resíduos contemporâneos de plantas C₃ e a MOAM retenha as assinaturas C₄ mais antigas, sistemas sob cultivo misto intensivo podem quebrar essa segregação por saturação temporária, registrando equivalência de aporte C₄ em ambos os compartimentos físicos.

A correlação negativa entre $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ confirma que a ciclagem intensiva e o fracionamento cinético do nitrogênio estão confinados à camada superficial sob influência biótica contemporânea, enquanto o empobrecimento em ^{15}N subsuperficial nos RR denota a translocação vertical e adsorção de compostos nitrogenados pouco transformados no regolito profundo.

Os RR preservam em suas camadas saprolíticas profundas a memória da expansão florestal C₃ sobre os campos nativos durante o Holoceno Médio e Tardio, sustentada por sistemas radiculares profundos e maior condensação aromática, funcionando como arquivos isotópicos paleoambientais. Os RL atuam como relictos pedológicos que preservam características herdadas de ambientes campestres mais áridos do Quaternário Tardio seco e frio.

5. Capítulo 3 – Carbono Oxidável por Permanganato (CPOx) e atividade enzimática como indicadores de saúde do solo em Neossolos do Bioma Pampa, Brasil

5.1. Introdução

O carbono orgânico do solo (COS) desempenha funções essenciais para o funcionamento dos ecossistemas, atuando no sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes, agregação do solo, retenção de compostos, conservação da biodiversidade e promoção da saúde das plantas. Por sua elevada sensibilidade às alterações de uso e manejo, o COS constitui um importante indicador da qualidade do solo, refletindo alterações na dinâmica da matéria orgânica.

A biodiversidade do solo organiza-se em uma estrutura hierárquica de interações biológicas que sustentam os processos ecossistêmicos (Beare *et al.*, 1995). Nesse contexto, as raízes exercem papel central ao conectar diferentes microambientes e fornecer compostos orgânicos por meio da rizodeposição, favorecendo comunidades microbianas diversificadas e funcionais (Bender *et al.*, 2016). O carbono proveniente de raízes vivas é incorporado ao solo com maior eficiência do que os resíduos vegetais, contribuindo significativamente para a formação de carbono associado aos minerais e de maior tempo de residência (Gregory, 2022; Sokol *et al.*, 2019). A atividade microbiana concentra-se, principalmente, em *hotspots* como a rizosfera, onde a disponibilidade de carbono e nutrientes intensifica os processos biológicos e as transformações da matéria orgânica (Kuzyakov; Blagodatskaya, 2015; Sokol *et al.*, 2022). Em contraste, grande parte do solo apresenta baixa disponibilidade de recursos,

limitando a atividade dos organismos (Moreira; Siqueira, 2006). A riqueza de espécies vegetais pode favorecer o incremento de carbono proveniente de raízes, bem como a atividade metabólica e a diversidade microbiana do solo. Muitas funções ecossistêmicas dos solos são determinadas por características bióticas das raízes que envolvem interações diretas com microrganismos, por meio da liberação de exsudatos radiculares que estimulam a atividade das comunidades microbianas no solo.

Em sistemas agrícolas com maior diversidade de espécies vegetais, a heterogeneidade de raízes contribui para um maior aporte de carbono orgânico. Em agroflorestas e cultivos consorciados, o maior aporte de carbono pelas raízes, amplia a biodiversidade edáfica e aumenta a resiliência do solo (Cezar *et al.*, 2015; Cezar *et al.*, 2025; Gamboa *et al.*, 2020; Leite *et al.*, 2021; Veloso *et al.*, 2018). Por outro lado, alterações no uso da terra e a intensificação agrícola modificam a composição das comunidades microbianas e afetam os estoques de MOS. Em ecossistemas tropicais, a conversão da Mata Atlântica para sistemas agrícolas reduziu significativamente o carbono orgânico do solo, enquanto práticas como reflorestamento, pousio e recuperação de pastagens favoreceram sua recomposição (Don; Schumacher; Freibauer, 2011; Santos *et al.*, 2019). O uso do solo com pastagens permanentes e rotações diversificadas, contribui para maior estabilidade dos estoques de carbono e para interações positivas entre atributos químicos e biológicos do solo (Wiesmeier *et al.*, 2015; Whitehead *et al.*, 2018). Em sistemas florestais, a cobertura contínua favorece a maior biomassa e estabilidade funcional. Nestes ambientes, manter os resíduos culturais e reduzir a perturbação física do solo são fundamentais para sustentar a atividade microbiana e, conseqüentemente, o potencial de sequestro de carbono (Schnecker *et al.*, 2023). Assim, a manutenção da matéria orgânica não deve ser vista apenas como estratégia de fertilidade, mas como elemento-chave para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Kumar *et al.*, 2017). Essas evidências reforçam a necessidade de indicadores capazes de integrar atributos físicos, químicos e biológicos e sensíveis para detectar alterações devidas aos diferentes usos do solo.

Entre os atributos mais responsivos às mudanças de uso e manejo do solo destacam-se as frações sensíveis do carbono orgânico e os indicadores

microbiológicos. O carbono oxidável por permanganato (CPOx) reflete as práticas que promovem o acúmulo ou estabilização da matéria orgânica e, portanto, pode ser um indicador útil do sequestro de carbono no solo a longo prazo (Hurisso *et al.*, 2016). O CPOx também se destaca como um indicador da fertilidade agrícola e de alterações promovidas pelo manejo (Culman *et al.*, 2012; Gomes *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2022; Svedin *et al.*, 2022). Além disso, o CPOx é considerado um indicador robusto da sustentabilidade do solo e de sua capacidade de manter estrutura e fertilidade do solo (Chambers *et al.*, 2024; Shafer *et al.*, 2021). Entretanto, embora inicialmente associado apenas à fração lábil do carbono, evidências recentes indicam que o CPOx representa grupos funcionais específicos da MOS (Christy *et al.*, 2023).

A integração do CPOx com indicadores microbiológicos amplia sua capacidade de diagnóstico, já que estes respondem rapidamente às mudanças nas condições do solo. Entre eles, a atividade do diacetato de fluoresceína (FDA) destaca-se como medida da atividade hidrolítica total, refletindo o metabolismo conjunto de fungos e bactérias e apresentando elevada sensibilidade às alterações de uso e manejo e aos processos de restauração de ecossistemas (Prosser; Speir; Stott, 2011; Silva; Siqueira; Costa, 2004). O incremento da atividade de FDA está associado à maior diversidade funcional, à intensificação da ciclagem de nutrientes e ao fortalecimento do potencial supressivo do solo frente a patógenos (Xia; Wander, 2021), evidenciando sua relevância como indicador da qualidade biológica do solo.

As atividades das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase também são amplamente empregadas como indicadores da qualidade do solo por sua participação direta nos ciclos do carbono e do enxofre e pela elevada sensibilidade às mudanças de uso e manejo (Dick; Breakwell; Turco, 1997; Lopes *et al.*, 2013; Mendes *et al.*, 2024; Moscatelli *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2024). Solos com maior biodiversidade e produtividade apresentam, em geral, maior atividade dessas enzimas (Barbosa *et al.*, 2023). Além disso, a relação entre a MOS e a atividade enzimática específica média (AEM) fundamentou o desenvolvimento do modelo dos quatro quadrantes (4QM), que classifica os solos quanto ao seu estado de saúde e aos processos de degradação ou regeneração biológica (Chaer *et al.*, 2023). Em conjunto, esses indicadores permitem

uma avaliação integrada da estabilidade do carbono, da atividade microbiana e da funcionalidade dos ecossistemas edáficos.

No bioma Pampa, a fragilidade dos Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), desenvolvidos sobre embasamento de granitos e gnaisses, torna ainda mais relevante o uso de indicadores integrados. Esses solos considerados frágeis (Albuquerque *et al.*, 2015), apresentam baixa resiliência e alta susceptibilidade à degradação. Isso significa que eles têm baixa capacidade de suportar distúrbios sem perda significativa de suas funções ecológicas. Nestes solos, a menor quantidade de argilominerais pode ser compensada, em parte, pelo maior potencial de aporte de fitomassa pelas culturas. Neste contexto, as práticas de manejo conservacionista podem promover maior acúmulo de carbono e promover uma maior diversidade microbiana. Entretanto, ainda são escassos os estudos que integrem frações sensíveis do carbono e indicadores microbiológicos, em RL e RR do bioma Pampa.

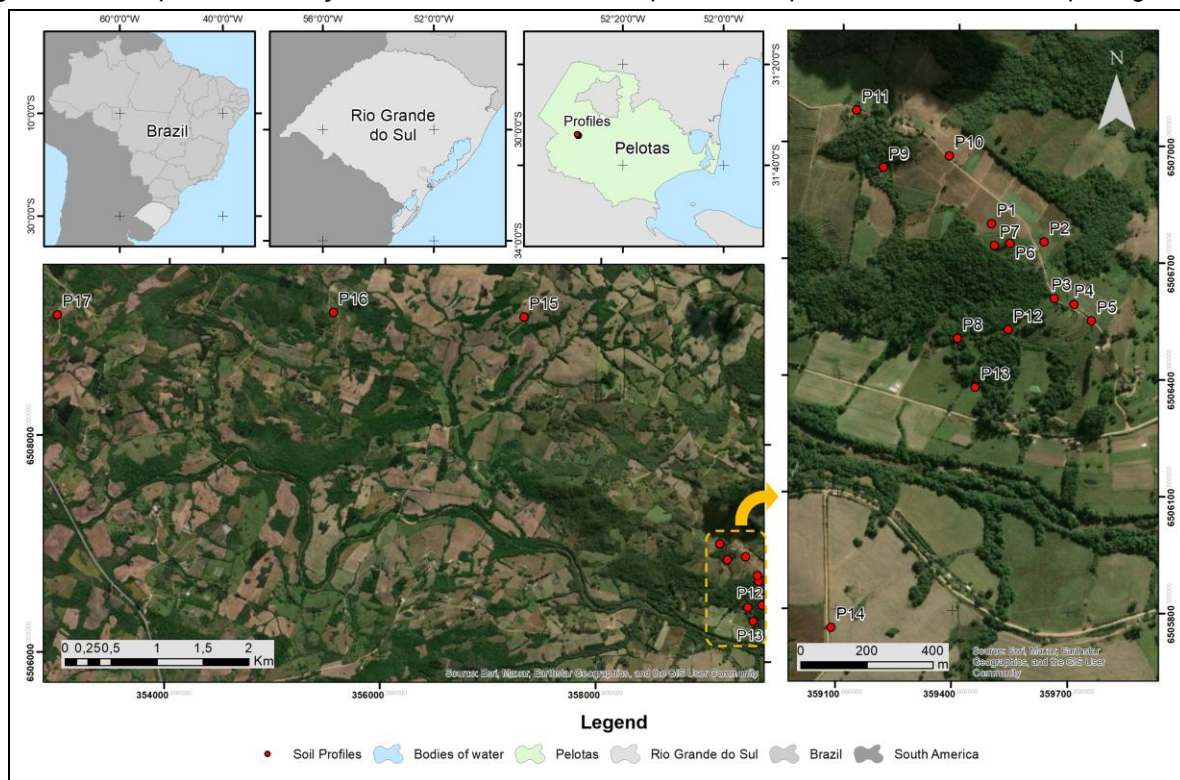
Apesar dos avanços na compreensão da dinâmica do MOS, em RL e RR ainda são necessários indicadores capazes de identificar alterações químicas e biológicas decorrentes dos diferentes usos do solo. Nesta perspectiva, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de diferentes usos do solo sobre o carbono orgânico total (COT), o carbono oxidável por permanganato (CPOX) e indicadores de atividade microbiana e enzimática em Neossolos Litólicos e Regolíticos do bioma Pampa, bem como analisar as relações entre esses indicadores e atributos físicos e químicos do solo. Hipotetiza-se que os usos com maior cobertura vegetal e menor perturbação física apresentem maiores teores de carbono e maior atividade microbiológica e enzimática; e que a magnitude dessas respostas diferencie Neossolos Litólicos e Regolíticos, em função de suas diferenças morfológicas e pedogenéticas.

5.2. Material e métodos

A área de estudo está situada na localidade do Quilombo, sétimo distrito de Pelotas, RS (Figura 5.1). A região contempla uma grande complexidade geológica

característica da província geomorfológica do Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG). O substrato geológico pertence à Suíte Pinheiro Machado formada por granitos e gnaisses (Philipp; Campos, 2004) que congrega elevada complexidade pedológica. O relevo local varia de plano à forte ondulado, com predomínio de relevo ondulado na maior parte da área, transicionando para forte ondulado em áreas de mata nativa.

Figura 5.1 – Mapa de localização da área de estudo e dispersão dos perfis de Neossolos na paisagem



Fonte: elaborado pelo autor

5.2.1. Coleta e caracterização das amostras de solo

As amostras de solo, oriundas de 17 perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos (RL, $n = 7$; RR, $n = 10$), foram coletadas na camada de 0-10 cm, em novembro de 2025. As áreas dos perfis P7 e P10 estavam divididas entre cultivos de milho e pomares de pêssigo. Por esta razão foram coletadas amostras em cada cultivo e denominadas como P7-L/P7-P e P10-L/P10-P (Apêndice A). As áreas avaliadas situam-se em propriedades rurais com sistema de produção de base agrícola familiar. O uso do solo é

dedicado ao cultivo de pomares de pêssego intercalado com lavouras anuais, principalmente de milho, campos nativos dedicados à pecuária leiteira e fragmentos de floresta estacional semidecidual, em diferentes estágios sucessionais. A caracterização da área de cada perfil e o histórico de uso e manejo adotado estão descritos no Apêndice A.

5.2.2. Análises químicas do solo

A caracterização química dos perfis foi realizada na camada de 0 – 10 cm. As determinações de pH, bases trocáveis e acidez do solo foram realizadas de acordo com Teixeira *et al.* (2017). O pH foi determinado em água na proporção de 1:1. O Ca^{2+} e o Mg^{2+} foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e a absorbância determinada em espectrômetro de absorção atômica. O K^{+} e Na^{+} extraídos com HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,025 mol L^{-1} , determinados por fotometria de chama. A acidez potencial foi extraída com KCl 1 mol L^{-1} e titulada por NaOH 0,025 mol L^{-1} com azul de bromotimol como indicador, sendo expressa como Al^{3+} trocável; H^{+}Al extraídos com $\text{Ca}(\text{OAc})_2$ 1 mol L^{-1} a pH 7,0 e acidez titulada por NaOH 0,0606 mol L^{-1} , com fenolftaleína como indicador. O P assimilável extraído com HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,025 mol L^{-1} e determinado por colorimetria.

5.2.3. Determinação do carbono orgânico total

A quantificação do carbono orgânico total (COT) foi realizada por oxidação com dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 0,167 mol L^{-1}) em meio ácido, utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) como reagente. Para isso, 0,5 g de amostra de TFSA, homogeneizada e moída em almofariz de ágata, foi submetida à reação com solução de dicromato, seguida de aquecimento em bloco digestor a 170°C, por 30 minutos. A titulação foi realizada com solução de sulfato ferroso amoniacal (sal de Mohr, 0,10 mol L^{-1}), utilizando o indicador Ferroin (o-fenantrolina) para determinar o ponto final. O teor de carbono orgânico foi

obtido com base no volume de solução de sal de Mohr utilizado na titulação, ajustado conforme controles estabelecidos por Mendonça e Matos (2017).

5.2.4. Carbono oxidável por permanganato de potássio – CPOx

O teor de CPOx foi determinado de acordo com o método descrito por Weil *et al.* (2003). Em tubos de centrífuga de 50 mL, foram adicionadas 2,5 g de TFSA e adicionados 20 mL de KMnO_4 0,02 M em CaCl_2 0,1 M, com pH 7,2. As amostras foram agitadas por 2 minutos a 120 rpm em um agitador orbital e deixadas em repouso por 10 minutos em ambiente isento de luminosidade. Foram diluídos 0,2 mL do sobrenadante em 10 mL de água destilada e determinada a absorbância a 550 nm. O teor de CPOx (mg kg^{-1}) foi determinado da seguinte forma:

$$\text{CPOx} = [0,02 \text{ mol L}^{-1} - (a + b \cdot \text{Abs})] \cdot (9 \text{ g cmol}^{-1}) \cdot \left(\frac{0,02 \text{ L solução}}{W} \right), \quad [1]$$

onde: $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ é a concentração inicial da solução de permanganato de potássio (KMnO_4) utilizada na reação; $[a + (b \cdot \text{Abs})]$ é a equação de calibração obtida a partir da curva padrão – *Abs* é a absorbância medida no espectrofotômetro, *a* é intercepto da curva de calibração e *b* o coeficiente angular da curva de calibração; (9 g cmol^{-1}) é o fator de conversão que relaciona a quantidade de permanganato reduzido com a massa de carbono oxidável equivalente; $0,02 \text{ L}_{\text{solução}}$ é o volume da solução de KMnO_4 utilizada na reação e *W* é a massa da amostra de solo (em gramas) utilizada no ensaio.

5.2.5. Atividade microbiana total

A determinação da atividade microbiana total foi realizada utilizando-se diacetato de fluoresceína (FDA) em amostras de duas gramas de TFSA, passada em peneira de 2 mm (Adam; Duncan, 2001). Uma solução tampão fosfato de 60 mM foi preparada a partir da dissolução de 8,7g de K_2HPO_4 e 1,3 g de KH_2PO_4 em 1.000 mL de água destilada e mantida sob refrigeração a 4°C. A solução de estoque de FDA ($1.000 \mu\text{g mL}^{-1}$

¹) foi obtida a partir da dissolução 0,1 g de FDA em 100 mL de acetona e armazenada a -20°C. Uma solução de estoque de 2.000 µg mL⁻¹ de fluoresceína foi preparada com a dissolução de 0,2265 g de sal de fluoresceína sódica em 100 mL de tampão fosfato 60 mM, a pH 7,6. A solução padrão de 20 µg mL⁻¹ de fluoresceína foi preparada adicionando-se 1 mL da solução de estoque de 2.000 µg mL⁻¹ de fluoresceína em tampão fosfato 60 mM pH 7,6 até completar 100 mL de volume final. A curva de padronização de 1 a 5 µg mL⁻¹ foi preparada a partir dessa solução padrão diluída em tampão fosfato 60 mM a pH 7,6.

De cada perfil de solo foram preparadas duas amostras (tratamento e controle) e adicionados 15 mL de tampão fosfato 60mM (pH 7,6). Para iniciar a reação, na amostra tratamento, foi adicionado 0,2 mL da solução de estoque FDA (1.000 µg mL⁻¹). Os frascos, controle e tratamento, foram fechados e colocados em agitador orbital a 30°C por 20 minutos. Após a incubação foi adicionado 15 mL de solução clorofórmio/metanol (2:1, v/v) para finalizar a reação. Os frascos foram tampados, agitados manualmente com força e, posteriormente, centrifugados a 2.000 rpm por três minutos. Após, o sobrenadante de cada amostra foi filtrado em filtro Whatman (n.º 2) em frascos de 50 mL. A absorbância da fluoresceína liberada foi medida em espectrofotômetro a 490 nm.

5.2.6. Análise enzimática

A atividade das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase foi determinada de acordo com Tabatabai (1994), com base na determinação colorimétrica do p-nitrofenol liberado por essas enzimas quando o solo foi incubado com uma solução tampão de substratos específicos para cada enzima. As amostras de TFSA foram passadas em peneira de malha 2mm (Mendes *et al.*, 2019). Para cada amostra foram conduzidos duas réplicas analíticas mais um controle. A leitura foi realizada em espectrofotômetro *Metash* UV-VIS/UV-5100, no comprimento de onda de 420 nm. Os resultados foram expressos em µg de p-nitrofenol por kg de solo por hora (µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹).

5.2.7. Análise da qualidade dos solos

Para definição dos limites críticos do modelo de quatro quadrantes (4QM) utilizou-se os teores médios de COT e da atividade enzimática específica média (AEM). Estes valores são considerados os limiares abaixo dos quais os agroecossistemas teriam suas funções ambientais comprometidas, prejudicando a qualidade do solo e o desenvolvimento das culturas (Carneiro *et al.*, 2024; Chaer *et al.*, 2023).

A AEM foi calculada a partir das atividades específicas da β -glicosidase e da arilsulfatase conforme a seguinte expressão:

$$AEM = \frac{\frac{\beta\text{-glicosidase}}{COT} + \frac{\text{Arilsulfatase}}{COT}}{2} \quad [2]$$

A média do COT e da AEM das amostras de solo foram analisados utilizando-se a visualização gráfica em quatro quadrantes, plotando a AEM no eixo das abcissas (x) e o COT no eixo das ordenadas (y). O quadrante 1 (COT alto/AEM alta) e o quadrante 3 (COT baixo/AEM baixa) representam padrões estáveis de solos de alta e baixa qualidade (solos saudáveis e não saudáveis), respectivamente. Os quadrantes 2 (COT alto/AEM baixa) e 4 (COT baixo/AEM alta) representam padrões transitórios ou solos passando por processos de degradação biológica (perda de C) e processos regenerativos (ganho de C), respectivamente (Mendes *et al.*, 2023).

5.2.8. Análise estatística

A abordagem estatística consistiu em uma análise exploratória dos dados, contemplando as principais medidas de posição e dispersão. A normalidade das distribuições foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias verificada por meio do teste de Levene. A análise de variação (ANOVA) foi utilizada para testar a significância da diferença entre as médias das variáveis observadas nas duas classes de Neossolos e entre as médias das variáveis nos diferentes usos do solo. Como procedimento *pós-hoc*, aplicou-se o teste de Tukey para comparação entre os

grupos. Para situações nas quais a suposição de homogeneidade de variâncias não foi atendida, empregou-se o teste *t* de Welch.

Em situações onde os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade não foram atendidos, foram utilizados testes não paramétricos, adequados para distribuições que não atendem a estes pressupostos. Os testes de Kruskal-Wallis e de Mann-Whitney foram aplicados para comparar as medianas entre os grupos, com o teste de Dunn *post hoc*. Todos os testes foram conduzidos considerando o nível de significância $\alpha = 0,05$.

Além dos testes de comparação, foram calculados índices que expressam a magnitude e a estrutura da variabilidade observada. O ômega quadrado (ω^2) foi utilizado como medida de tamanho de efeito (Fan; Konold, 2010), indicando a proporção da variância total explicada pelos fatores em análise (equação 3). Já o coeficiente de correlação intraclasse (ICC) foi aplicado para avaliar a consistência interna dos grupos (Xian; Zhang, 2025), expressando a proporção da variabilidade atribuída às diferenças entre eles em relação à variabilidade total (equação 4).

$$\omega^2 = \frac{SQ_{\text{entre}} - (gl_{\text{entre}} \cdot QM_{\text{erro}})}{SQ_{\text{total}} + QM_{\text{erro}}} \quad [3]$$

onde: SQ_{entre} é a Soma de Quadrados entre grupos (variabilidade explicada pelo fator); gl_{entre} são os graus de liberdade entre grupos (número de grupos – 1); QM_{erro} é o Quadrado Médio do erro (variabilidade média dentro dos grupos); SQ_{total} é a Soma de Quadrados total (variabilidade total observada).

O tamanho do efeito foi considerado pequeno ($\omega^2 < 0,20$); moderado ($0,20 \leq \omega^2 < 0,40$), grande ($0,40 \leq \omega^2 < 0,60$) e muito grande ($\omega^2 > 0,60$).

$$ICC = \frac{\sigma_{\text{grupo}}^2}{\sigma_{\text{grupo}}^2 + \sigma_{\text{erro}}^2} \quad [4],$$

onde: σ_{grupo}^2 é variância entre grupos; σ_{erro}^2 é a variância do erro. O σ_{grupo}^2 é obtido a partir da equação [5]:

$$\sigma_{\text{Grupo}}^2 = \frac{QM_{\text{entre}} - QM_{\text{dentro}}}{n} \quad [5],$$

onde: QM_{entre} é a média dos quadrados entre grupos; QM_{dentro} é a média dos quadrados dentro dos grupos e n é o número médio de observações por grupo.

Os resultados do ICC foram classificados como de baixa confiabilidade ($ICC < 0,25$); moderada confiabilidade ($0,25 \leq ICC < 0,50$), alta confiabilidade ($0,50 \leq ICC < 0,75$) e muito alta confiabilidade ($\geq 0,75$).

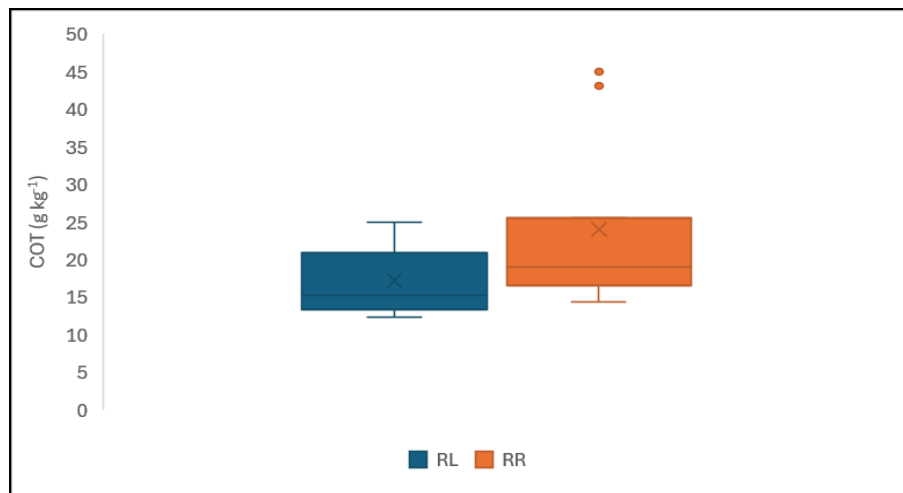
A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada ao conjunto mínimo de variáveis químicas, físicas e biológicas, a partir de uma matriz de correlações. O critério de Kaiser (autovalores $> 1,0$) foi utilizado para selecionar as componentes principais (CP) significativas. Todas as análises foram realizadas utilizando-se o *software* PAST 4.03 (Hammer; Harper; Ryan, 2001).

5.3. Resultados

5.3.1. Comparações entre Neossolos Litólicos e Regolíticos

No conjunto das observações, o carbono orgânico total (COT) apresentou uma média de $20,90 \text{ g kg}^{-1}$ ($\pm 8,92 \text{ g kg}^{-1}$), com grande amplitude de variação ($32,69 \text{ g kg}^{-1}$), variando de $12,30 \text{ g kg}^{-1}$, em área de lavoura recentemente cultivada com batatas, a $44,99 \text{ g kg}^{-1}$, em área de mata nativa. Nos RL a média observada foi de $17,13 \text{ g kg}^{-1}$ ($\pm 4,38 \text{ g kg}^{-1}$), variando de $12,30 \text{ g kg}^{-1}$ a $24,97 \text{ g kg}^{-1}$, com amplitude de variação de $12,67 \text{ g kg}^{-1}$. Nos RR, o teor médio de COT foi superior, $23,98 \text{ g kg}^{-1}$ ($\pm 10,61 \text{ g kg}^{-1}$), variando entre $14,39$ e $44,99 \text{ g kg}^{-1}$, com maior amplitude de variação ($30,60 \text{ g kg}^{-1}$). Na Figura 5.2 destacam-se os valores extremos nos RR, registrados em perfis de mata nativa (P12 e P13). A comparação dos teores de COT entre RL e RR, por meio da análise da variação (ANOVA), não resultou em diferenças estatísticas significativas ($F = 3,269$; $p = 0,0873$).

Figura 5.2 – Teores de carbono orgânico total (COT) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG

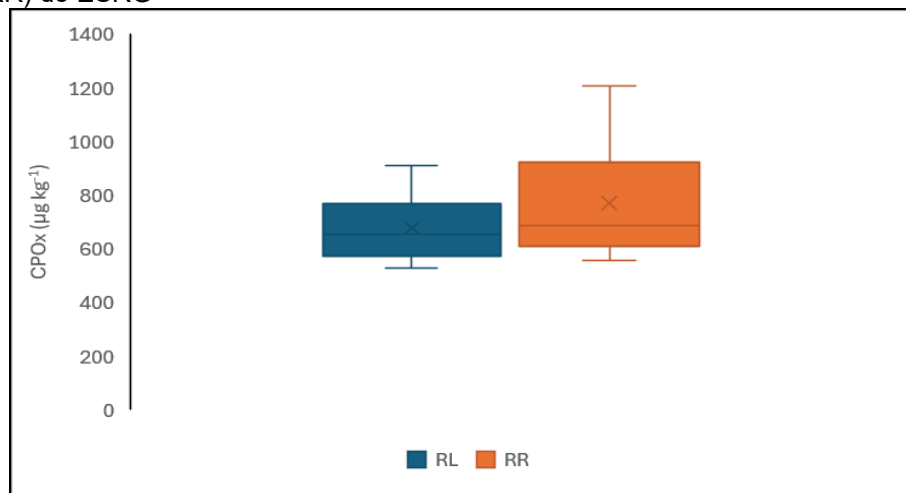


Fonte: elaborado pelo autor

A média do teor do carbono oxidável por permanganato (CPOx) foi de 727,36 mg kg⁻¹ ($\pm$ 174,62 mg kg⁻¹), com mínimo de 528,21 mg kg⁻¹ (em área de campo) e máximo de 1.206,32 mg kg⁻¹ (em área de mata nativa), com amplitude de variação de 678,11 mg kg⁻¹. Em RL a média de CPOx foi de 677,07 ($\pm$ 128,33 mg kg⁻¹), com amplitude de variação de 380,54 mg kg⁻¹ (528,21 – 908,75 mg kg⁻¹). Nos RR a média foi 768,50 mg kg⁻¹ ($\pm$ 201,56 mg kg⁻¹), com amplitude de variação de 650,58 mg kg⁻¹ (555,74 – 1.206,32 mg kg⁻¹) (Figura 5.3). A ANOVA não resultou significativa para a comparação entre as médias de CPOx.

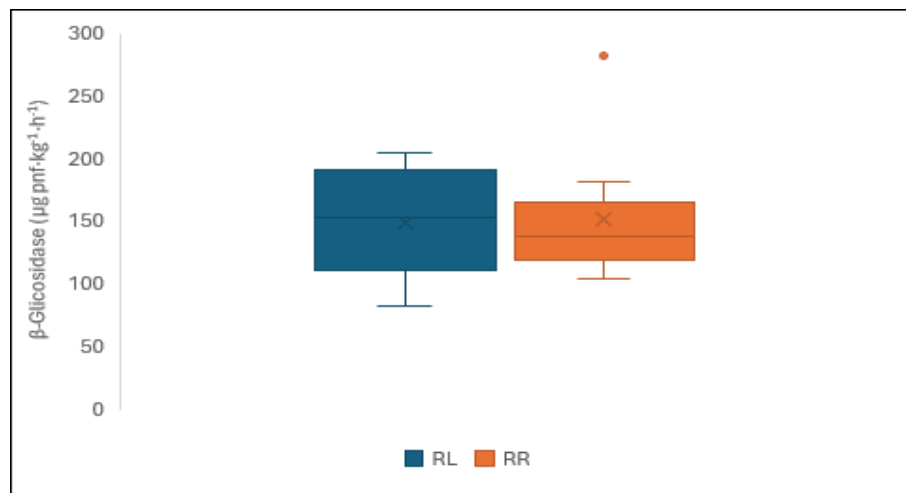
Em geral, a média da atividade da β -Glicosidase foi de 150,15 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹ ($\pm$ 45,77 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹), com mínimo em RL (82,48 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹) e máximo em RR (282,06 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹) (Tabela 5.2). Em Neossolos Litólicos a atividade média da β -glicosidase foi de 148,48 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹, variando de 82,48 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹ em área de pomar (P15) a 204,56 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹ (pomar P7). Em Neossolos Regolíticos, a média foi 151,51 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹, com mínimo em área de campo (P14=104,43 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹) e máximo em mata nativa (P12=282,06 μ g pnf·kg⁻¹·h⁻¹). No *boxplot* da Figura 5.4, destaca-se a observação em mata nativa (P12) como um valor discrepante do conjunto das observações. Submetidas à ANOVA, a atividade média da β -Glicosidase não apresentou diferenças significativas entre RL e RR, ($p > 0,05$).

Figura 5.3 – Teores de carbono oxidável por permanganato (CPOx) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 5.4 – *Boxplot* da atividade da β -Glicosidase em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG

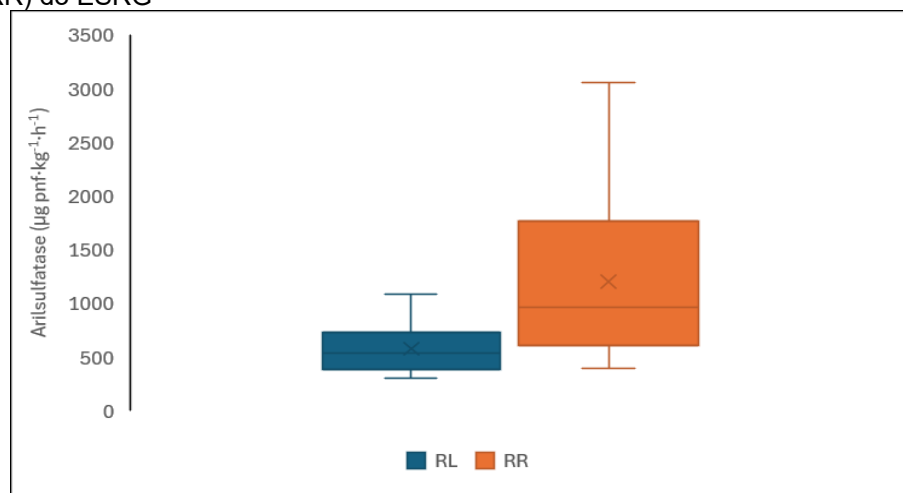


Fonte: elaborado pelo autor

A atividade média da arilsulfatase foi de $919,98 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ($\pm 690,22 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), com menor teor em RL, em área de lavoura ($300,62 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) e máximo em RR, em mata nativa ($3.059 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). Nos RL a arilsulfatase foi de $575,67 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ($\pm 244,92 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), variando entre $300,62 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ (lavoura P10) a $1.084,99 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ (pomar P7). Em RR a média foi $1.201,69 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ($\pm 814,37 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), com uma amplitude de variação relativamente maior, com mínimo de $398,23 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ (pomar P4) e máximo de $3.059,44 \mu\text{g}$

$\mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ (mata nativa P12) (Figura 5.5). A comparação entre as atividades da arilsulfatase em RL e RR resultou significativa pelo teste de Welch ($F = 6,181$; $p = 0,0308$), com atividade média superior nos RR (Apêndice D).

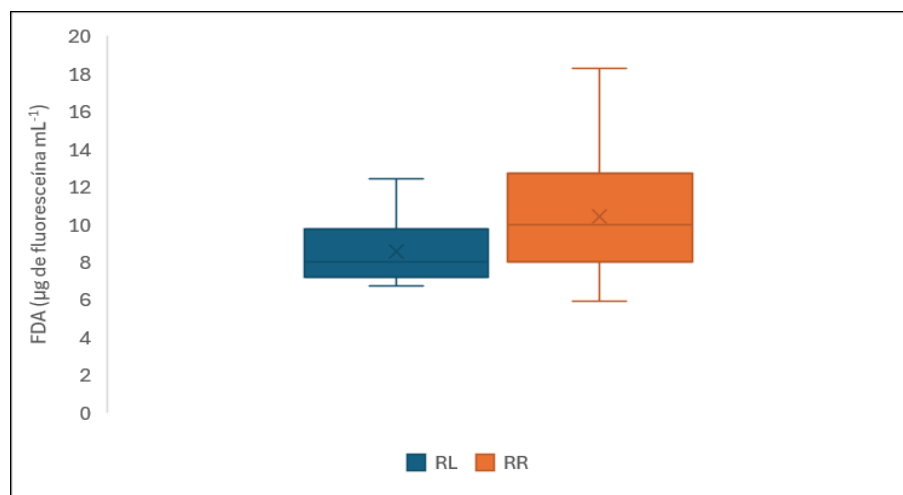
Figura 5.5 – *Boxplot* da atividade da arilsulfatase ($\mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG



Fonte: elaborado pelo autor

A média da atividade microbiana total (FDA) foi de $9,57 \mu\text{g}$ de fluoresceína mL^{-1} ($\pm 3,10 \mu\text{g mL}^{-1}$) com mínimo em área de pomar ($5,91 \mu\text{g}$ de fluoresceína mL^{-1}) e máximo em área de mata nativa ($18,27 \mu\text{g}$ de fluoresceína mL^{-1}). Em RL a atividade média de FDA foi de $8,55 \mu\text{g}$ de fluoresceína mL^{-1} ($\pm 1,89 \mu\text{g mL}^{-1}$) e, em RR, de $10,41 \mu\text{g mL}^{-1}$ ($\pm 3,70 \mu\text{g mL}^{-1}$), com amplitudes de variação de $5,70 \mu\text{g}$ de fluoresceína mL^{-1} ($6,71 - 12,41 \mu\text{g mL}^{-1}$) e $12,37 \mu\text{g}$ de fluoresceína mL^{-1} ($5,91 - 18,27 \mu\text{g mL}^{-1}$), respectivamente (Figura 5.6). Os testes de comparação, entre as médias de RL e RR, não resultaram em diferenças estatísticas significativas ($p > 0,05$).

Figura 5.6 – Teores de diacetato de fluoresceína (FDA) em Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do ESRG



Fonte: elaborado pelo autor

5.3.2. Comparações entre os diferentes dos usos do solo

Os teores de COT apresentaram ampla variação entre os usos, onde áreas de mata nativa exibiram os maiores teores médios ($37,86 \text{ g kg}^{-1}$, $\pm 10,74 \text{ g kg}^{-1}$). Em contraste, as lavouras apresentaram o menor teor médio de COT ($15,66 \text{ g kg}^{-1}$; $\pm 3,22 \text{ g kg}^{-1}$). As áreas de campos e pomares situaram-se em posições intermediárias, com médias de $18,35 \text{ g kg}^{-1}$ ($\pm 4,15 \text{ g kg}^{-1}$) e $18,83 \text{ g kg}^{-1}$ ($\pm 4,70 \text{ g kg}^{-1}$), respectivamente (Tabela 5.1).

Os resultados do COT evidenciaram diferenças significativas entre os usos do solo (Apêndice D). A ANOVA indicou efeito altamente significativo ($p = 0,00044$), embora o teste de Levene, tenha apontado heterogeneidade de variâncias ($p = 0,0334$), comprometendo a robustez da análise. Isto levou o teste de Welch a não confirmar a significância global ($p = 0,0952$). Essa divergência reforça a necessidade de considerar os testes não paramétricos como mais confiáveis. O teste de Kruskal-Wallis indicou diferença significativa entre as medianas ($p = 0,0407$) e os testes de Mann-Whitney e Dunn confirmaram contrastes relevantes, especialmente entre mata nativa e os demais usos ($p < 0,05$). Os índices de efeito reforçam a robustez dos resultados, com ICC (0,69) de alta confiabilidade e um efeito forte revelado pelo ω^2 (0,61), demonstrando

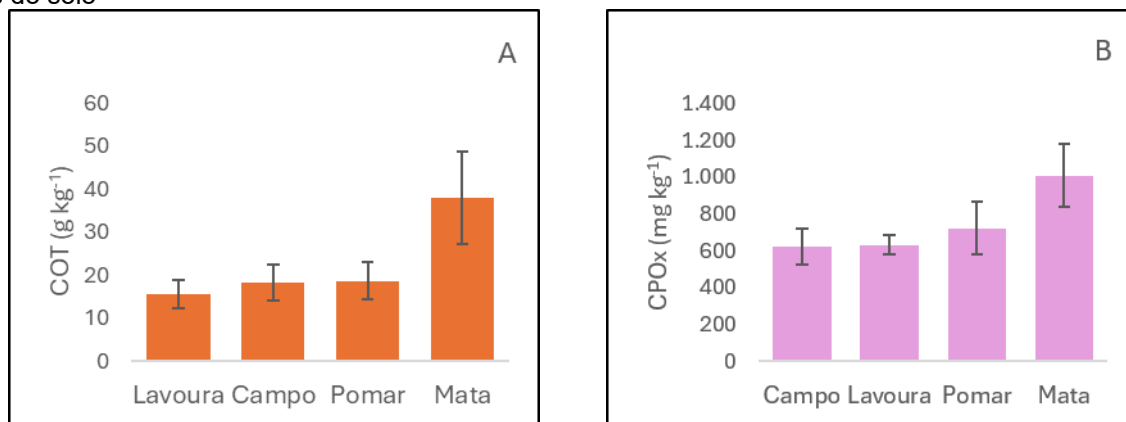
que grande parte da variabilidade do COT é explicada pelo tipo de uso do solo. Os resultados evidenciam que os teores médios de COT (Figura 5.7-A) em áreas de mata nativa destacam-se de forma consistente dos demais agroecossistemas.

Tabela 5.1 – Teores de carbono orgânico no solo COT (g kg^{-1}) e de carbono orgânico oxidado por permanganato CPOx (mg kg^{-1}), em 17 perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR)

Perfil	Classificação	Uso do Solo	COT	CPOx
P9	RR	Campo	16,51	684,40
P11	RL	Campo	14,09	528,21
P14	RR	Campo	18,98	555,74
P16	RR	Campo	23,81	728,44
P1	RL	Lavoura	15,10	654,39
P6	RL	Lavoura	15,19	650,13
P7	RL	Lavoura	12,30	553,28
P10	RL	Lavoura	20,06	669,96
P8	RR	Mata	25,51	922,71
P12	RR	Mata	44,99	1206,32
P13	RR	Mata	43,08	895,90
P2	RL	Pomar	21,79	908,75
P3	RR	Pomar	24,89	958,65
P4	RR	Pomar	15,26	637,27
P5	RR	Pomar	18,70	559,18
P7	RL	Pomar	24,97	856,16
P10	RL	Pomar	18,02	680,65
P15	RL	Pomar	12,64	592,11
P17	RR	Pomar	14,39	610,21

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 5.7 – Teores de médios ($\pm dp$) de COT (A) e CPOx (B), em Neossolos do ESRG, sob diferentes usos do solo



Fonte: elaborado pelo autor

O CPOx acompanhou os padrões de COT, mas com maior sensibilidade às variações de uso (Figura 5.7-B). Áreas de mata nativa apresentaram os maiores valores médios (1.008 mg kg^{-1} ; $\pm 172,01 \text{ mg kg}^{-1}$), enquanto áreas de campos nativos registraram os menores ($624,20 \text{ mg kg}^{-1}$; $\pm 97,28 \text{ mg kg}^{-1}$), semelhantes aos observados em lavouras ($631,94 \text{ mg kg}^{-1}$; $\pm 53,13 \text{ mg kg}^{-1}$) enquanto os pomares mostraram valores intermediários ($737,87 \text{ mg kg}^{-1}$; $\pm 145,93 \text{ mg kg}^{-1}$), mas com menor dispersão dos dados. Destaca-se que, em algumas áreas de pomares (P2, P3 e P7), os resultados de CPOx foram semelhantes aos observados em áreas de mata nativa (P8 e P13).

Entre os usos do solo, a ANOVA aplicada aos resultados de CPOx evidenciou diferenças altamente significativas ($p = 0,0051$). Entretanto, o teste de Levene indicou heterogeneidade de variâncias ($p = 0,0233$), conduzindo o teste de Welch a não confirmar a significância do resultado ($p = 0,0576$). Contudo, o teste de Tukey demonstrou que áreas de mata nativa apresentaram valores de CPOx, significativamente maiores quando comparados a áreas de campo ($p = 0,0065$), lavoura ($p = 0,0076$) e pomar ($p = 0,0315$). As demais comparações não apresentaram diferenças estatísticas. Os testes não paramétricos reforçaram parcialmente esse padrão. O teste de Kruskal-Wallis não indicou diferença global significativa ($p = 0,0730$), mas os testes de Mann-Whitney e Dunn confirmaram contrastes relevantes entre mata e os demais usos ($p < 0,05$). Os índices de efeito sustentam a interpretação, com $\text{ICC} \approx 0,55$ (confiabilidade alta) e $\omega^2 \approx 0,46$ (efeito grande). Isso indica que o tipo de uso do solo explica de forma consistente uma parcela expressiva da variabilidade do CPOx, reforçando sua sensibilidade como indicador de qualidade do solo.

A β -glicosidase apresentou um gradiente entre os diferentes agroecossistemas, onde áreas de campo nativo apresentaram menor atividade ($112,42 \text{ } \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), resultados intermediários em pomares e lavouras ($148,26$ e $159,46 \text{ } \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente) e maior atividade em áreas de mata nativa ($200,49 \text{ } \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) (Tabela 5.2 e Figura 5.8-A). A diferença entre as médias nos agroecossistemas avaliados pela ANOVA resultou não significativa ($p = 0,0858$). Mesmo considerando variâncias desiguais, não houve significância pelo teste de Welch ($p = 0,1028$). Embora nenhuma comparação par a par tenha atingido significância rigorosa, o teste de Tukey

para o contraste entre matas e campos nativos ($p = 0,0595$) sinaliza uma forte tendência de diferenciação, corroborado pelos testes não-paramétricos de Mann-Whitney ($p = 0,0518$) e Kruskal-Wallis ($p = 0,1060$). O teste *post-hoc* de Dunn reforçou esse indicativo ao diferenciar áreas de campo e mata ($p = 0,0180$), evidenciando certa inconsistência entre os critérios estatísticos. Essa limitação na detecção de diferenças significativas é capturada pela moderada confiabilidade do ICC (0,2699) e pela moderada diferenciação dos usos verificada pelo ω^2 (0,2077). O conjunto dos resultados aponta para a insuficiência do tamanho amostral em captar o efeito real das diferenças na atividade enzimática entre os usos da terra.

Tabela 5.2 – Valores da atividade microbiana total – FDA ($\mu\text{g mL}^{-1}$), β -glicosidase ($\mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$); arilsulfatase ($\mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) e atividade enzimática específica média – AEM ($\mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), nos diversos usos do solo, em Neossolos Litólicos (RR) e Regolíticos (RR) do ESRG

Perfil	Classe	Uso do Solo	FDA	β -glicosidase	Arilsulfatase	AEM
P9	RR	Campo	8,26	129,99	960,94	33,03
P11	RL	Campo	12,41	96,39	743,32	29,80
P14	RR	Campo	10,20	104,43	643,05	19,70
P16	RR	Campo	12,72	118,85	528,39	13,59
P1	RL	Lavoura	7,27	124,84	433,80	18,50
P6	RL	Lavoura	7,99	203,53	531,45	24,19
P7	RL	Lavoura	6,71	129,90	402,61	21,65
P10	RL	Lavoura	7,64	179,57	300,62	11,97
P8	RR	Mata	7,97	137,79	1.766,68	37,33
P12	RR	Mata	18,27	282,06	3.059,44	37,13
P13	RR	Mata	14,84	181,61	2.167,74	27,26
P2	RL	Pomar	8,40	152,64	361,57	11,80
P3	RR	Pomar	6,07	165,68	943,45	22,28
P4	RR	Pomar	5,91	148,60	398,23	17,92
P5	RR	Pomar	9,97	110,03	1.022,41	30,27
P7	RL	Pomar	8,55	204,56	1.084,99	25,82
P10	RL	Pomar	7,06	162,45	615,56	21,59
P15	RL	Pomar	10,88	82,48	707,11	31,24
P17	RR	Pomar	9,83	159,69	1.121,52	44,52

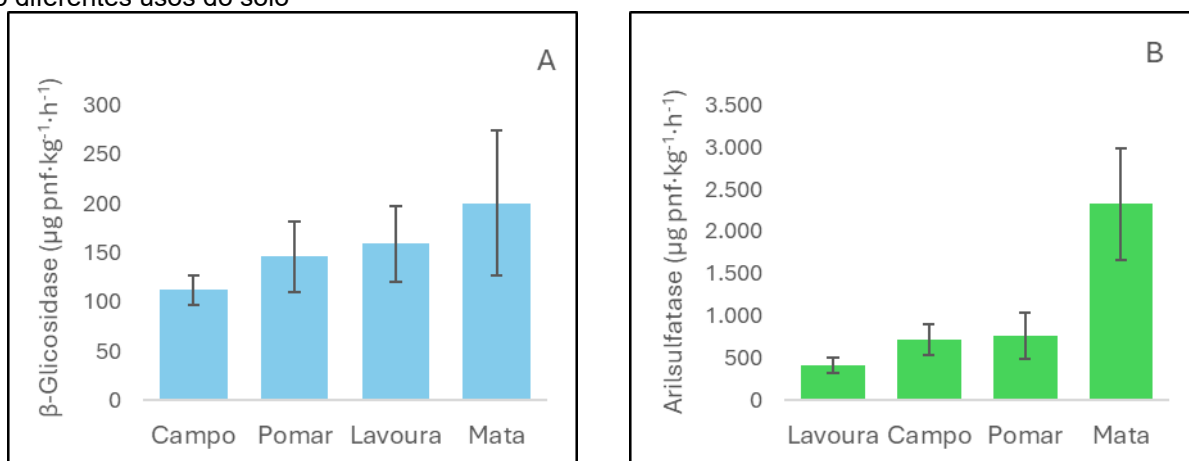
Fonte: elaborado pelo autor

A arilsulfatase registrou o menor valor de atividade em perfil avaliado em área de lavoura P10 ($300,62 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). Em contrapartida a maior atividade da arilsulfatase ($3.059,44 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) foi observada no perfil P12 em mata nativa (Tabela 5.2). A menor atividade média da arilsulfatase foi registrada em área de lavouras ($\approx 417 \mu\text{g}$

pnf·kg⁻¹·h⁻¹; ±95,10 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹) e a máxima em área de mata nativa (2.331,29 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹; ±661,72 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹). Áreas de campo nativo e de pomar apresentaram atividades enzimáticas médias semelhantes, com valores de 718,93 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹ (±183,69 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹) e 781,85 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹ (±284,67 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹), respectivamente (Figura 5.8-B).

A arilsulfatase demonstrou elevada sensibilidade aos usos da terra, conforme evidenciado pelas diferenças altamente significativas nos testes paramétricos (ANOVA, $p = 9,33 \times 10^{-6}$; Welch, $p = 0,0097$). O teste *pós-hoc* de Tukey confirmou a superioridade da mata nativa em relação aos pomares ($p = 2,73 \times 10^{-5}$) e aos demais usos do solo. A robustez dessas inferências é reforçada pela elevada confiabilidade do ICC (0,8243) e o efeito muito forte do ω^2 (0,7689), demonstrando que a maior parte da variabilidade da atividade da arilsulfatase é estritamente explicada pelo fator uso do solo.

Figura 5.8 – Valores médios (±dp) da atividade da β -Glicosidase (A) e da arilsulfatase (B), em Neossolos, sob diferentes usos do solo



Fonte: elaborado pelo autor

A média da atividade enzimática média (AEM) nos diversos agroecossistemas foi de 25,24 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹ (±9,02 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹) com mínimo, em área de pomar P2 (11,80 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹) e máximo em área de mata nativa P8 (37,33 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹). A AEM em áreas de lavoura apresentou a menor média entre os agroecossistemas 19,08 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹ (±5,28 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹) e a maior média foi em áreas de mata nativa 33,91 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹ (±5,76 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹). Em áreas de campo e pomar, a média da AEM apresentou valores semelhantes, respectivamente, de 24,03 µg pnf·kg⁻¹·h⁻¹ (±8,98 µg

$\text{pnf} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) e $25,68 \mu\text{g pnf} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ($\pm 9,91 \mu\text{g pnf} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$). Estes resultados indicam um gradiente claro onde os valores de AEM decrescem com a conversão para áreas agrícolas: lavouras < pomares $\approx$ campos < matas nativas (Figura 5.9-A).

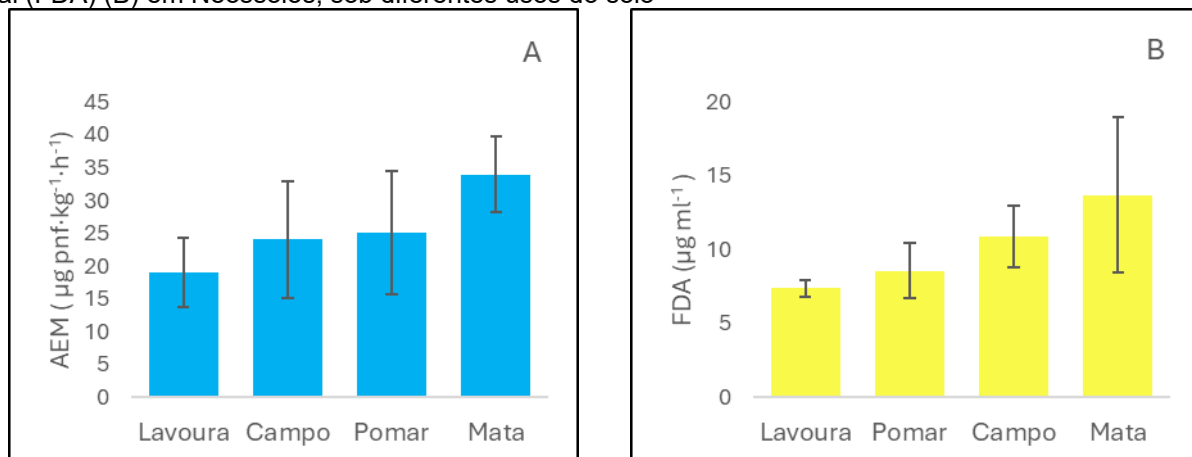
Os resultados da AEM, ainda que sugiram tendências de variação entre os usos do solo, não apresentaram evidências estatísticas suficientes para conclusões confiáveis. A atividade enzimática específica média (AEM) não apresentou diferenças estatisticamente robustas entre os usos do solo. Os testes paramétricos (ANOVA e Welch) não indicaram significância e os testes não paramétricos (Kruskal-Wallis, Mann-Whitney) confirmaram ausência de diferenças consistentes. Os índices de efeito ($\omega^2 = 0,1097$ e $\text{ICC} = 0,1481$) reforçam que a magnitude da diferença é pequena e de baixa confiabilidade.

A atividade média da FDA nos diversos agroecossistemas foi de $9,52 \mu\text{g}$ de fluoresceína mL^{-1} ($\pm 3,18 \mu\text{g mL}^{-1}$), com mínimo (P4 = $5,91 \mu\text{g mL}^{-1}$) e máximo (P12 = $18,27 \mu\text{g mL}^{-1}$) em áreas de pomar. Nos diversos agroecossistemas, a atividade média da FDA (Figura 5.9-B) evidenciou um gradiente onde áreas de lavoura apresentaram a menor média de atividade da FDA ($7,40 \mu\text{g mL}^{-1}$; $\pm 0,55 \mu\text{g mL}^{-1}$), valores médios intermediários em pomares ($8,33 \mu\text{g}$ de fluoresceína mL^{-1} ; $\pm 1,85 \mu\text{g mL}^{-1}$) e campos ($10,90 \mu\text{g}$ de fluoresceína mL^{-1} ; $\pm 2,09 \mu\text{g mL}^{-1}$) e a máxima atividade média em áreas de mata nativa ($13,70 \mu\text{g mL}^{-1}$; $\pm 5,24 \mu\text{g mL}^{-1}$).

A atividade da FDA apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os usos do solo pela ANOVA ($p = 0,0156$), entretanto, a violação da homogeneidade de variâncias (Levene $p = 0,0120$) e o resultado não significativo do teste de Welch ($p = 0,0730$), sugerem cautela na interpretação. Em consonância, os testes não paramétricos não confirmaram diferenças globais (Kruskal-Wallis $\rightarrow p = 0,0655$), mas apontaram contrastes específicos, como campo vs. lavoura (Mann-Whitney $\rightarrow p = 0,0304$; Dunn $\rightarrow p = 0,0304$) e lavoura vs. mata nativa (Dunn $\rightarrow p = 0,0329$). A ambiguidade da interpretação é reforçada pelos índices de efeito, onde o ω^2 ($0,3741$) de efeito moderado e o ICC ($0,4573$) de moderada confiabilidade, indicam que a variabilidade explicada pelos grupos não é suficientemente robusta. Os resultados sugerem tendência de maior atividade em áreas de mata nativa, coerente com a maior

diversidade e disponibilidade de substratos nesses ambientes, mas a baixa confiabilidade estatística limita a segurança dessa conclusão.

Figura 5.9 – Valores médios ($\pm$ dp) da atividade enzimática média (AEM) (A) e da atividade microbiana total (FDA) (B) em Neossolos, sob diferentes usos do solo



Fonte: elaborado pelo autor

5.3.3. Caracterização química dos solos

Os atributos químicos e os indicadores de acidez ativa da camada superficial (0–10 cm) dos Neossolos Litólicos e Regolíticos apresentaram variações nítidas em função dos agroecossistemas e manejos adotados (Tabela 5.3). Os valores de pH apresentaram grande amplitude entre ambientes naturais e manejados, variando de um mínimo de 4,4 no perfil P16 (campo nativo) até um máximo de 6,2 verificado no perfil P4 (pomar).

As áreas de campo nativo concentraram os maiores índices de acidez ativa entre as áreas avaliadas, com valores de pH iguais ou inferiores a 5,0 (4,4 a 5,0). Esse padrão de acidez acentuada nos perfis de campo (P9, P11, P14 e P16) operou em paralelo com os maiores teores de alumínio trocável (Al^{3+}), atingindo o pico de 2,4 cmol_c kg⁻¹ e uma saturação por alumínio (Al%) de 40,0% no perfil P16. Isto resultou nas menores taxas de saturação por bases (V%) observadas, com marcas de 20,6% (P16) e 40,2% (P11). Nos perfis sob mata nativa, o pH apresentou comportamento moderadamente ácido, oscilando em um intervalo estreito entre 5,0 (P13) e 5,5 (P8 e P12), com valores de V% situados entre 48,0% e 69,4%.

Tabela 5.3 – Atributos químicos da camada superficial (0-10 cm) dos perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR), sob diferentes usos do solo

Perfil	Classe	Uso do Solo	pH	Ca	Mg	K	Al	H+Al	CTC	Al	V
			H ₂ O	cmol _c kg ⁻¹						%	
P1	RL	Lavoura ¹	5,5	5,3	2,1	0,4	0,1	4,4	7,9	1,3	63,8
P2	RL	Lavoura ¹	5,1	7,2	2,4	0,3	0,2	6,9	10,1	2,0	58,7
P3	RR	Pomar	5,3	7,0	1,7	0,2	0,3	5,5	9,2	2,7	61,5
P4	RR	Pomar	6,2	7,7	2,8	0,5	0,0	2,5	11,1	0,0	81,2
P5	RR	Pomar	5,0	3,7	1,6	0,2	0,4	6,2	6,0	6,7	46,8
P6	RL	Pomar	5,6	5,5	1,9	0,2	0,1	4,4	7,8	1,3	63,1
P7	RL	Pomar	5,5	7,7	3,0	0,4	0,1	5,5	11,2	0,9	66,7
P7	RL	Lavoura ²	5,7	6,1	2,4	0,4	0,1	3,9	9,1	1,1	69,2
P8	RR	Mata nativa	5,5	8,7	2,1	0,4	0,1	4,9	11,4	0,9	69,4
P9	RR	Campo	5,0	3,9	1,1	0,4	0,8	7,7	6,3	12,7	41,1
P10	RL	Lavoura ¹	6,1	6,0	2,4	0,3	0,0	2,8	8,7	0,0	75,5
P10	RL	Pomar	5,9	4,4	1,7	0,2	0,0	2,5	6,4	0,0	71,2
P11	RL	Campo	4,8	3,1	1,3	0,3	1,3	6,9	6,0	21,7	40,2
P12	RR	Mata nativa	5,5	11,7	2,6	0,4	0,2	6,9	15,0	1,3	67,7
P13	RR	Mata nativa	5,0	6,1	1,0	0,2	0,8	7,7	8,2	9,8	48,0
P14	RR	Campo	4,9	3,8	1,6	1,0	0,8	7,7	7,4	10,8	44,4
P15	RL	Pomar	5,0	3,0	0,7	0,4	0,4	5,5	4,5	8,9	42,5
P16	RR	Campo	4,4	2,1	1,3	0,2	2,4	13,7	6,0	40,0	20,6
P17	RR	Pomar	5,1	3,2	0,8	0,4	0,2	6,2	4,6	4,3	41,2

Legenda: 1 – lavoura de milho; 2 – lavoura de batatas e abóboras

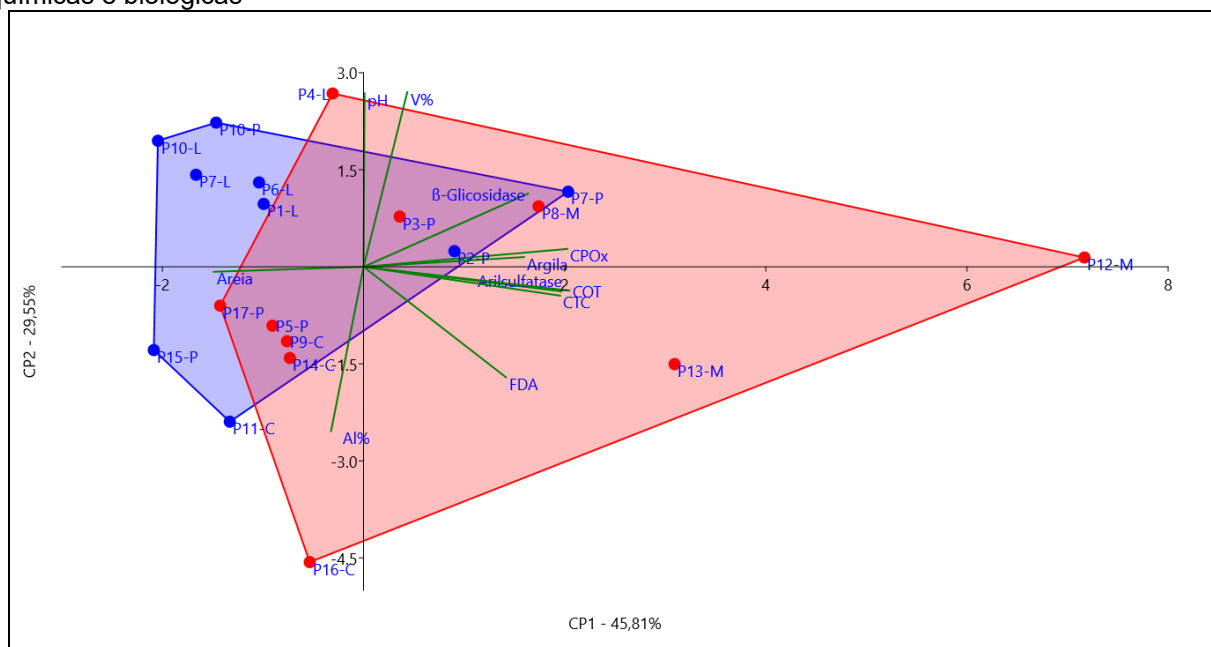
Fonte: elaborado pelo autor

Em contrapartida, os ambientes manejados e submetidos a cultivos agrícolas de lavoura e pomar exibiram os maiores valores de pH e saturação por bases do estudo. Nas áreas de lavoura, o pH variou entre 5,5 (P1) e 6,1 (P10), enquanto o V% se elevou para patamares entre 58,7% e 75,5%. Nos pomares, o pH estendeu-se de 4,9 (P15) a 6,2 (P4), acompanhado por incrementos expressivos no complexo sortivo, com os maiores teores de cálcio (Ca²⁺) trocável atingindo 7,7 cmol_c kg⁻¹ nos perfis P4 e P7, culminando na maior saturação por bases registrada no experimento (V% = 81,2% no perfil P4).

5.3.4. Análise de Componentes Principais

A análise de componentes principais (ACP) explicou 85,64% da variância total, distribuída em três componentes significativas (autovalores > 1). Na Figura 5.10 pode-se visualizar relação entre os vetores de cada variável selecionada e a distribuição dos diversos perfis do solo nas dimensões estabelecidas pelas CP1 e CP2, que, em conjunto, explicaram 75,36% da variabilidade dos dados. A CP1 (45,81%) agrupou fortemente variáveis ligadas à qualidade química e biológica do solo, com cargas (*loadings*) distribuídas entre COT (0,40), CPOx (0,40), arilsulfatase (0,39), CTC (0,39), β -glicosidase (0,32), argila (0,31) e areia (-0,29).

Figura 5.10 – Dispersão dos perfis de Neossolos Litólicos e Regolíticos em relação às variáveis físicas, químicas e biológicas



Legenda: Neossolos Litólicos (●); Neossolos Regolíticos (●); C – campo; L – lavoura; M – mata nativa; P – pomar. Al% - saturação de alumínio; CTC – capacidade de troca de cátions; V% - saturação de cátions; percentuais de areia e argila

Fonte: elaborado pelo autor

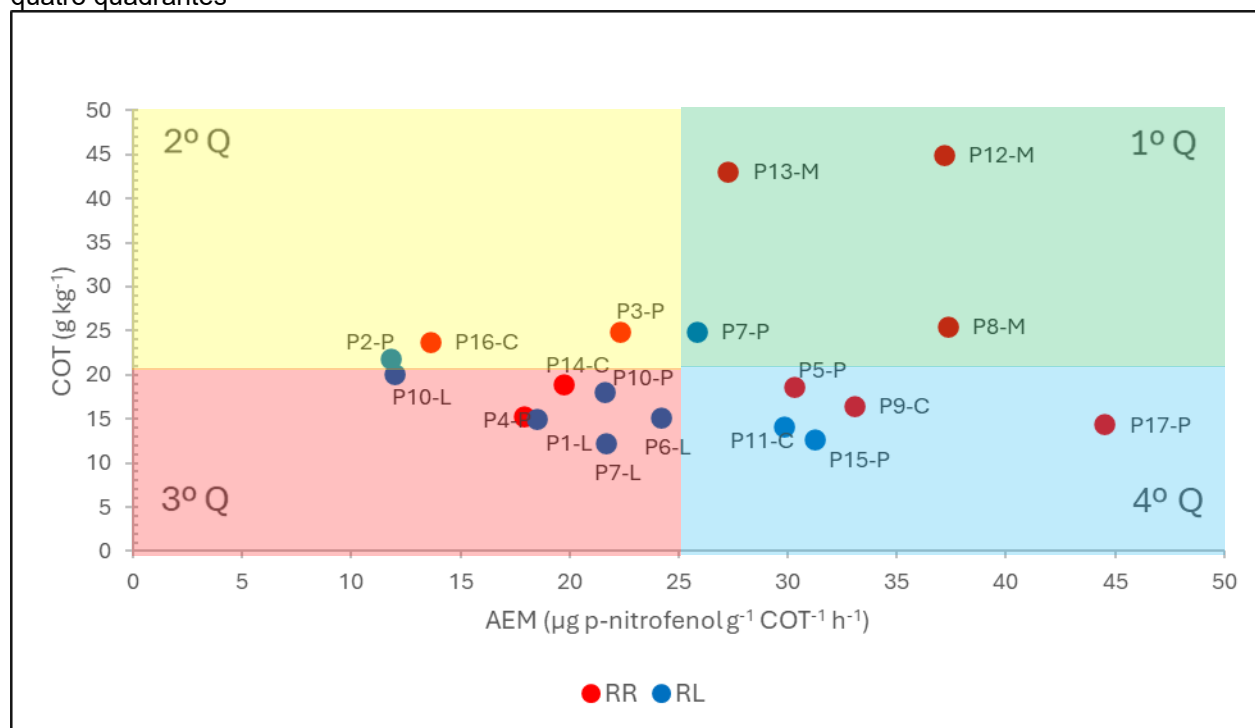
Na dimensão positiva da CP1 situaram-se em solos com maior percentual de argila e elevados teores de carbono orgânico e atividade microbiológica, vinculados a ambientes de mata nativa e alguns pomares. Em oposição, áreas de campos e cultivos agrícolas foram associados a solos com maiores teores de areia. A CP2 (29,55%) foi

constituída principalmente por variáveis químicas, onde pH (0,53) e V% (0,53) carregaram positivamente, em contraposição ao Al% (-0,50) e, com menor intensidade a FDA (-0,34). A CP3 (10,28%) apresentou maior contribuição das frações granulométricas, com areia (0,59) carregando positivamente em contraste com argila (-0,53).

5.3.5. Avaliação da saúde do solo utilizando o 4QM

Os teores limites de COT e AEM, aplicados na divisão dos quatro quadrantes, equivalentes ao nível de probabilidade de 50% da distribuição Normal acumulada, foram, respectivamente, de 21,07 g kg⁻¹ e 25,24 µg pnp g⁻¹ COT⁻¹ h⁻¹. O resultado da distribuição dos perfis nos quatro quadrantes está apresentado na Figura 5.11 e um ranqueamento dos perfis em cada quadrante é apresentado na Tabela 5.4.

Figura 5.11– Dispersão dos perfis de Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) do bioma Pampa nos quatro quadrantes



Legenda: C – campo; L – lavoura; M – mata nativa; P – pomar

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 5.4 – Resultados do método de quatro quadrantes (4QM) para os Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR)

Quadrante	Perfil	Classe	Uso do solo	COT	AEM
Q1	P12	RR	Mata nativa	44,99	37,13
	P13	RR	Mata nativa	43,08	27,26
	P8	RR	Mata nativa	25,51	37,33
	P7	RL	Pomar	24,97	25,82
Q2	P3	RR	Pomar	24,89	22,28
	P16	RR	Campo	23,81	13,59
	P2	RL	Pomar	21,79	11,80
Q3	P10	RL	Pomar	18,02	21,59
	P14	RR	Campo	18,98	19,70
	P10	RL	Lavoura	20,06	11,97
	P6	RL	Lavoura	15,19	24,19
	P1	RL	Lavoura	15,10	18,50
	P4	RR	Pomar	15,26	17,92
	P7	RL	Lavoura	12,30	21,65
Q4	P17	RR	Pomar	14,39	44,52
	P9	RR	Campo	16,51	33,03
	P5	RR	Pomar	18,70	30,27
	P15	RL	Pomar	12,64	31,24
	P11	RL	Campo	14,09	29,80

Fonte: elaborado pelo autor

No primeiro quadrante (Q1) foram agrupadas todas as áreas de mata nativa (P8, P12 e P13), juntamente com a área de pomar P7 (alto COT e alta AEM). Entre as áreas em regeneração (Q4 – baixo COT e alta AEM) situaram-se áreas de pomar (P5, P15 e P17) e campo nativo (P9 e P11), enquanto os solos em processos de degradação, situados no Q2 (alto COT e baixa AEM), foram constituídos por duas áreas de pomares (P2 e P3) e uma de campo nativo (P16). O Q3, que reuniu as áreas classificadas como degradadas (baixo COT e baixa AEM), congregou todas as áreas de lavoura (P1, P6, P7 e P10), além de três pomares (P4, P5 e P10) e uma área de campo nativo (P14).

5.4. Discussão

5.4.1. Teores de carbono orgânico total e carbono oxidável por permanganato

As áreas de mata nativa exibiram o maior teor médio de COT ($37,86 \text{ g kg}^{-1}$) em relação a áreas de cultivos agrícolas. Resultados semelhantes foram obtidos por Machado *et al.* (2014) e Troian *et al.* (2020), confirmando que a diversidade de sistemas radiculares e o aporte de resíduos em ambientes conservados é consistente com maior acúmulo e estabilização do carbono no solo (Fernando *et al.* 2024). Em contraste, as lavouras apresentaram o menor valor médio ($15,66 \text{ g kg}^{-1}$), evidenciando a perda de carbono sob uso intensivo. Campos nativos e pomares situaram-se em posições intermediárias, com médias de $18,35$ e $18,83 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, refletindo condições de transição entre o *status* de conservação e o de degradação do solo. Destaca-se a semelhança entre os teores de COT observados em pomares e campos nativos, embora a amplitude de variação tenha sido maior nos pomares do que nos campos. Esses resultados convergem com Machado *et al.* (2024), que observaram estoques de COT semelhantes entre sistemas agrícolas conduzidos em plantio direto e áreas de pastagem no bioma Pampa. Isto reforça que o manejo conservacionista e o aporte de resíduos orgânicos atenuam as perdas de carbono. Ainda que pomares sejam sistemas de baixa diversidade vegetal, o uso de plantas de cobertura com diferentes sistemas radiculares pode contribuir para uma ciclagem mais eficiente da MOS. Essa diversidade radicular pode explicar, ao menos em parte, a manutenção de valores intermediários de COT em alguns pomares.

Os maiores teores médios de CPOx foram registrados em áreas de mata nativa (1.008 mg kg^{-1}), enquanto campos nativos (624 mg kg^{-1}) lavouras apresentaram os menores. Os valores em lavouras (632 mg kg^{-1}) foram semelhantes aos de campos nativos, possivelmente refletindo o aporte recente de palhada de culturas anteriores. Os pomares mostraram valores intermediários ($\approx 738 \text{ mg kg}^{-1}$), mas com maior dispersão, sugerindo heterogeneidade estrutural e influência direta do histórico do manejo agrícola. Em pomares específicos (P2, P3 e P7), os resultados de CPOx foram

comparáveis aos observados em áreas de mata nativa (P8 e P13). Essa amplitude de valores entre os sistemas avaliados sugere que dessa fração é altamente dependente do uso da terra. Embora as frações mais acessíveis do carbono constituam substrato importante para os processos bioquímicos do solo, reconhece-se que o CPOx não reflete exclusivamente carbono lábil. Os resultados encontrados confirmam a interpretação de Christy *et al.* (2023), de que o CPOx é sensível ao manejo por refletir também compostos fenólicos acumulados e não apenas carbono lábil. Isso explica a razão pela qual áreas de mata nativa conservadas mantêm valores elevados, enquanto sistemas agrícolas intensivos exibem reduções significativas. Contudo, cultivos perenes, com grande aporte de resíduos, podem manter uma fração ativa de carbono suficiente para sustentar estoques elevados de COT a longo prazo.

5.4.2. Atividade microbiológica nos diferentes agroecossistemas

As áreas de campo e mata nativa apresentaram teores superiores de FDA em relação a áreas de lavouras e pomares. Isto aponta que o não revolvimento do solo em sistemas campestres e florestais, mais diversos, mantém uma biomassa microbiana mais ativa e estável que sistemas de cultivo intensivo (Anghinoni; Vezzani, 2021). A menor atividade microbiana em áreas de lavoura denota que a maior exposição e perturbação física do solo, associada ao menor aporte de resíduos limitam o desenvolvimento da microbiota. Estes resultados evidenciam a forte dependência energética dos microrganismos em relação à disponibilidade de carbono. Entretanto, convém destacar que essas diferenças numéricas devem ser interpretadas estritamente como tendência geral do comportamento biológico, reconhecendo a elevada variabilidade espacial intrínseca e limitações estatísticas deste indicador.

A atividade média da β -glicosidase, apesar das restrições estatísticas descritas, aumenta gradualmente de campo para mata nativa, acompanhando o incremento de COT, sugerindo que o uso da terra direciona a funcionalidade enzimática. Nos sistemas agrícolas, os valores moderados e relativamente homogêneos de β -glicosidase, indicam

que o manejo agrícola impõe uma padronização física e química, sustentando certa estabilidade funcional. Em pomares, a expressiva amplitude de variação reflete a heterogeneidade local de manejo e aporte orgânico, permitindo que perfis específicos, como P7 (RL) e P3 (RR), alcancem níveis de atividade comparáveis aos de ecossistemas de mata nativa. Em áreas de campos nativos a menor atividade enzimática está associada, possivelmente, a limitações no aporte contínuo de resíduos vegetais e na disponibilidade de frações lábeis de carbono (Veres *et al.*, 2015).

A maior atividade média de β -glicosidase, observada em mata nativa, reflete o acúmulo de matéria orgânica e a diversidade microbiana típica de ambientes conservados, onde há maior ciclagem de carbono e estabilidade ecológica. Esse padrão é consistente com o observado por Trasar-Cepeda, Leirós e Gil-Sotres (2008), que reportaram valores significativamente menores em solos agrícolas, em contraste com matas de carvalho (*Quercus robur*) utilizadas como referência.

Tian *et al.* (2020) ampliaram esta análise e investigaram como o crescimento microbiano e a cinética da β -glicosidase em *hotspots* da rizosfera são modulados pela disponibilidade de MOS, em solos férteis e degradados. Os resultados indicaram que em solos pobres, os *hotspots* apresentam taxa específica de crescimento 1,2 vezes maior que o solo adjacente, o que sugere forte estímulo em função de entradas de carbono lábil. Em solos férteis, não houve diferença significativa entre *hotspots* e *bulk soil*, sugerindo que a alta disponibilidade de nutrientes suaviza contrastes locais.

Em geral verifica-se que ambientes conservados ou manejados de forma sustentável apresentam maior atividade da β -glicosidase, enquanto sistemas agrícolas intensivos tendem a reduzir este indicador. Práticas conservacionistas podem aumentar em 53% a atividade da β -glicosidase em relação ao manejo convencional (Mariscal-Sancho; Ball; McKenzie, 2018), sendo que a concentração de β -glicosidase é maior em solos orgânicos (Moscatelli *et al.*, 2012). A atividade da β -glicosidase responde de forma imediata às mudanças no aporte de resíduos orgânicos, funcionando como um indicador sensível da disponibilidade de carbono lábil (Veres *et al.*, 2015). Isto porque, o crescimento microbiano e a cinética da β -glicosidase em *hotspots* da rizosfera são modulados pela disponibilidade de MOS (Tian *et al.*, 2020). Isto evidencia que a

qualidade biológica do solo está diretamente associada à diversidade microbiana e ao aporte de matéria orgânica e destaca a importância do preparo do solo na manutenção da atividade enzimática e da estabilidade estrutural.

A atividade da arilsulfatase apresentou expressiva sensibilidade, superando a resposta observada para a β -glicosidase, delineando um claro gradiente crescente de atividade enzimática na sequência: lavouras < campos nativos < pomares << matas nativas. Em ecossistemas de maior complexidade e com maior diversidade radicular a atividade microbiana especializada é beneficiada (Mendes *et al.*, 2012). Em contrapartida, a simplificação do sistema e a menor diversidade de raízes reduz a atividade microbiológica, comprometendo a estabilidade funcional do solo (Trasar-Cepeda; Leirós; Gil-Sotres, 2008). Esse padrão evidencia que o uso intensivo do solo reduz a funcionalidade biológica, enquanto sistemas conservados ou com aporte orgânico contínuo otimizam a ciclagem de enxofre e a qualidade bioquímica dos Neossolos. Adicionalmente, a conversão de áreas de mata nativa para cultivos agrícolas altera profundamente o microclima dos fragmentos florestais remanescentes, afetando variáveis como temperatura do ar, umidade do solo, insolação (Scariot *et al.*, 2003), impactando diretamente comunidades fúngicas. Sob esta ótica, Lisboa *et al.* (2012) sugerem que a atividade da arilsulfatase poderia ser utilizada como indicador indireto da presença de fungos no solo. Isto porque, dentre os componentes da biomassa microbiana, os fungos destacam-se por sintetizar ésteres de sulfatos, os quais servem de substrato para a ação dessa enzima.

Em áreas de lavoura, os valores de arilsulfatase oscilaram entre 300,62 e 531,45 $\mu\text{g pnp g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, indicando atividade enzimática moderada e homogênea, coerente com a baixa diversidade de raízes e com o manejo agrícola que tende a reduzir a diversidade microbiana. Os valores foram mais heterogêneos nos pomares e a maior amplitude dos dados (361,57 a 1.121,52 $\mu\text{g pnp g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) reflete diferenças locais de manejo e aporte orgânico. Alguns pomares apresentaram atividade próxima à de lavouras, enquanto outros atingiram níveis elevados, sugerindo maior acúmulo de resíduos vegetais e estímulo à microbiota. Os campos nativos, caracterizaram-se como solos com atividade intermediária superior à de lavouras, mas menos variáveis que pomares, refletindo a

diversidade de espécies de plantas e uniformidade da rizosfera. Nas matas nativas, foram registrados os maiores valores de arilsulfatase, representando ambientes com alta atividade biológica, maior diversidade estrutural e funcional dos sistemas radiculares e elevado aporte de resíduos orgânicos. A atividade da arilsulfatase observada por Trasar-Cepeda, Leirós e Gil-Sotres (2008) apresentou comportamento semelhante com o verificado nas áreas de Neossolos do ESRG. A arilsulfatase foi fortemente reduzida em áreas agrícolas alcançando menos de 10% dos valores observados em matas de carvalhos utilizadas como referência, enquanto em pastagens, a atividade manteve-se semelhante à referência.

As diferenças de uso do solo afetam diretamente a quantidade e a qualidade da matéria orgânica disponível e, conseqüentemente, a atividade enzimática. Nas áreas de lavoura, a redução da β -glicosidase e da arilsulfatase pode ser explicada pela menor entrada de resíduos orgânicos frescos e pela maior degradação da matéria orgânica pelo revolvimento frequente do solo, que podem inibir enzimas específicas. Em áreas de cultivos de pomares, a β -glicosidase manteve ou superou os níveis de matas e campos nativos, devido ao aporte contínuo de resíduos lignocelulósicos. A arilsulfatase teve comportamento semelhante, embora tenha apresentado atividade reduzida em alguns pomares (P2 e P4) e seus limites superiores ficaram muito aquém dos verificados em áreas de matas nativas, entretanto, superaram os observados em campos nativos. O não revolvimento do solo em áreas de pomares favoreceu as atividades enzimáticas. Em contrapartida, áreas de lavoura apresentaram menores teores de COT, embora sem redução proporcional da atividade enzimática específica. Embora o revolvimento nas lavouras reduza os teores absolutos de COT, constatou-se um enriquecimento relativo das atividades enzimáticas por unidade de carbono nesses sistemas intensivos. Isso sinaliza que, sob estresse ou menor disponibilidade de substrato, a microbiota expressa uma compensação funcional, intensificando a síntese de exoenzimas por unidade de matéria orgânica remanescente para suprir suas demandas elementares. A análise conjunta das duas enzimas evidencia que ambientes conservados ou manejados de forma sustentável apresentam maior funcionalidade bioquímica, enquanto sistemas agrícolas intensivos reduzem esses indicadores. Estas

evidências reforçam a importância destas enzimas como indicadores sensíveis da qualidade biológica do solo.

5.4.3. Influência da acidez do solo na atividade microbiológica e enzimática

O pH e as práticas de calagem emergiram expressas nos resultados da caracterização química dos perfis (Tabela 5.3) como um dos principais fatores reguladores dos agroecossistemas analisados, exercendo influência direta sobre as atividades biológicas e enzimáticas na camada superficial (0–10 cm). No entanto, o efeito da acidez edáfica mostrou-se intimamente condicionado pela interação com os atributos físicos e as práticas de manejo adotadas em cada perfil. Enquanto as áreas de campo nativo apresentaram os maiores índices de acidez (com valores de pH inferiores a 5,0), os ambientes sob uso intensivo de lavoura e pomar exibiram os maiores valores de pH, refletindo as práticas de calagem para a correção da acidez do solo na região leste do ESRG.

Nos perfis de mata nativa (pH $\approx$ 5,0–5,5), observa-se um equilíbrio químico e biológico ideal. Esse intervalo de acidez moderada favorece a solubilidade de nutrientes e a estabilização da matéria orgânica do solo (MOS), criando condições ótimas para a ciclagem biogeoquímica. Esse cenário reflete-se nas elevadas atividades da arilsulfatase ($> 1.700 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) e da β -glicosidase ($>180 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), operando em sincronia com altos teores de COT e CPOx.

Em contrapartida, nos ambientes de campo nativo, a acidez mais acentuada (pH $\approx$ 4,4–5,0) coincidiu com menores taxas de acúmulo de carbono e redução na atividade das enzimas específicas. Esse padrão sugere que a acidez excessiva, acompanhada pela provável elevação na saturação por alumínio (Al^{3+}) e menor saturação por bases (V%), atua como um fator limitante à expressão metabólica da microbiota e à eficiência catalítica das exoenzimas.

Nas áreas de lavoura e pomar manejados, embora os valores de pH mais elevados (5,6–6,2) sugerissem um ambiente químico teoricamente mais favorável, a

atividade enzimática específica média (AEM) tendeu ao decréscimo. Esse comportamento indica que os atributos físicos, como a densidade do solo elevada e a redução da macroporosidade, atuaram como fatores restritivos preponderantes, limitando a difusão de oxigênio e a colonização microbiana dos *hotspots* rizosféricos, anulando os benefícios da correção da acidez.

Adicionalmente, as alterações de pH induzidas pelo manejo podem modificar diretamente a conformação estrutural das proteínas enzimáticas, afetando sua capacidade catalítica. Conforme reportado por Daunoras, Kačergius e Gudiukaitė (2024) e Adetunji *et al.* (2017), a atividade da β -glicosidase diminui gradualmente à medida que o pH do solo se eleva acima de seu ótimo biológico. Esse fenômeno foi observado de forma clara no perfil P4 (pomar), onde a elevação do pH para 6,2, associada a um baixo teor de COT ($15,26 \text{ g kg}^{-1}$), culminou na redução da atividade da arilsulfatase para apenas $398,23 \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$.

Curiosamente, a atividade microbiana total medida pela FDA apresentou um comportamento inverso, demonstrando elevada resiliência à acidez natural desses Neossolos. Todos os valores de FDA superiores a $10,0 \mu\text{g mL}^{-1}$ foram registrados em solos com $\text{pH} \leq 5,5$, concentrando-se nos ambientes menos perturbados de mata e campo nativo. Esse padrão pode ser explicado por alterações na estrutura das comunidades microbianas, visto que o pH ácido desfavorece grande parte dos grupos bacterianos e seleciona comunidades fúngicas ativas (Moreira; Siqueira, 2006). Como a hidrólise da FDA reflete a atividade combinada de enzimas hidrolíticas de uma vasta gama de microrganismos, incluindo os fungos, o incremento da biomassa fúngica nesses solos ácidos de referência (P12 e P13) sustentou as elevadas leituras de FDA, mesmo sob o estresse químico da acidez. Ademais, o aporte contínuo de resíduos de cobertura (aveia preta e nabo forrageiro) e serapilheira arbórea nesses ambientes fornece energia metabólica suficiente para mitigar os efeitos deletérios do baixo pH.

Em termos práticos de manejo para os Neossolos de origem granítica do ESRG, os dados indicam que a busca pela neutralidade química via calagem excessiva é desnecessária e prejudicial à qualidade biológica. O principal motor da saúde desses solos reside no aporte constante de frações lábeis de carbono (CPOx), cujos maiores

teores $> 800 \text{ mg kg}^{-1}$ ocorreram na faixa ideal de pH entre 5,0 e 5,5. O perfil P12 (mata nativa) consolida essa premissa: mesmo sob acidez moderada (pH 5,5), o solo exibiu excelente preservação da macroporosidade ($0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), estimulando picos de atividade biológica (FDA = $18,27 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$) e enzimática (β -glicosidase = 282,06 e arilsulfatase = $3.059,44 \text{ } \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). Valores de acidez excessiva (pH $\leq 5,0$), como no perfil P16, reduzem a atividade da arilsulfatase ($528,39 \text{ } \mu\text{g pnf}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) devido à restrição química, enquanto valores elevados (pH $\geq 6,2$), como no perfil P4, reduzem a microbiota pela degradação física e perda de carbono. Assim, o equilíbrio sustentável nesses Neossolos é alcançado mantendo-se o solo ligeiramente ácido, onde o manejo conservacionista protege a funcionalidade biológica sem os prejuízos causados pela calagem superdimensionada.

5.4.4. Associações multivariadas entre indicadores

A ACP mostrou que tanto o COT quanto o CPOx carregaram fortemente na dimensão positiva da CP1, eixo que congrega as variáveis de qualidade biológica e de acúmulo de carbono. Todas as áreas de mata nativa e os pomares vinculados aos perfis P2 P3 e P7, foram associados a estas variáveis. Isso significa que os maiores estoques de carbono estão diretamente associados à diversidade de sistemas radiculares e ao aporte diferenciado de resíduos orgânicos (Lange *et al.* 2015; Tiemann *et al.*, 2015). Em matas nativas, a presença de múltiplas espécies vegetais garante resíduos variados (folhas, galhos, raízes finas e exsudatos radiculares), alimentando diferentes nichos microbianos (Bender *et al.*, 2016; Bhattacharyya *et al.* 2021). A diversidade de substratos, conforme verificado por Tian *et al.* (2020) favorece a formação de frações estáveis de carbono no solo, tanto lábeis (capturadas pelo CPOx) quanto recalcitrantes (refletidas no COT).

Nos sistemas agrícolas, em especial nas lavouras, Neossolos mais arenosos associados ao aporte restrito de resíduos reduzem a diversidade de compostos orgânicos disponíveis (Prescott *et al.*, 2021). Isto resulta em menores teores de COT e

CPOx, posicionando os sistemas agrícolas na dimensão negativa da CP1. A mineralização acelerada, associada à menor cobertura e à compactação, está correlacionada à menor formação de estoques estáveis de carbono, resultando em solos biologicamente empobrecidos.

Os pomares e campos nativos ocupam posições intermediárias, refletindo transições entre conservação e degradação. Nos pomares, embora a diversidade de espécies seja menor que nas matas, o uso de plantas de cobertura amplia a diversidade de sistemas radiculares (profundos e superficiais) que contribuem para a incorporação de carbono em diferentes camadas do solo. Nos pomares, a utilização de plantas de cobertura atua de forma decisiva na incorporação de carbono em diferentes profundidades do perfil. Essa diversidade na arquitetura radicular reflete-se na similaridade dos teores de CPOx observada entre os perfis de pomares (P2, P3 e P7) e as matas nativas. A diversidade funcional de raízes estimula a atividade microbiana (Cezar *et al.*, 2025; Gamboa *et al.*, 2020; Liao *et al.*, 2025) e favorece a manutenção e a renovação constante das frações ativas de carbono, aproximando a dinâmica desses agroecossistemas cultivados àquela observada sob condições de mata nativa (Cezar *et al.*, 2015). Já os campos nativos, apesar de apresentarem menor diversidade vegetal, sustentam estoques intermediários de COT e CPOx, refletindo a adaptação da microbiota a resíduos predominantemente herbáceos e à acidez mais elevada (CP2).

A atividade da FDA associou-se de forma consistente ao gradiente de qualidade biológica e de carbono representado pela CP1, acompanhando o vetor de variáveis como COT, CPOx, β -glicosidase e arilsulfatase. Essa estreita relação positiva converge com Silva, Siqueira e Costa (2004) e reforça que a FDA atua como um indicador integrado de fertilidade bioquímica, refletindo diretamente a abundância de substratos lábeis e a diversidade microbiológica em ambientes conservados, com destaque para a mata nativa. Na CP2, entretanto, a FDA carregou negativamente, posicionando-se em oposição ao pH e à saturação de bases (V%), e alinhando-se ao alumínio (Al%). Essa dinâmica sugere uma resposta adaptativa ou de resiliência da atividade microbiana total às condições químicas de maior acidez natural e saturação por alumínio, típicas dos Neossolos da região (Botelho *et al.*, 2014; Fehrenbach *et al.*, 2019). Como os

ambientes mais conservados de mata nativa (P12 e P13) e campo nativo (P11, P14 e P16) exibem pH moderado a fortemente ácido ($\text{pH} \leq 5,5$), esse ambiente químico desfavorece o crescimento bacteriano e seleciona uma comunidade fúngica altamente ativa e adaptada (Moreira; Siqueira, 2006). A FDA emerge como um indicador transversal, capaz de refletir tanto a disponibilidade de carbono e a ciclagem biológica (Silva; Siqueira; Costa, 2004) quanto os gradientes de acidez, reforçando seu papel como indicador da qualidade ecológica dos Neossolos. Esse padrão sugere que a estrutura física porosa, o pH ligeiramente ácido e o aporte contínuo de carbono são mais determinantes para sustentar a funcionalidade e a saúde biológica desses Neossolos do que a proximidade com a neutralidade química ou a alcalinização induzida por calagem excessiva nas lavouras.

5.4.5. Avaliação da saúde do solo em Neossolos utilizando o Método dos Quatro Quadrantes

No Q1, situaram-se todos os perfis de mata nativa, com maiores teores médios de COT ($34,64 \text{ g kg}^{-1}$) e AEM ($31,89 \text{ } \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Além disso esses perfis apresentaram altos teores médios de CPOx ($970,28 \text{ mg kg}^{-1}$) e de FDA ($12,41 \text{ } \mu\text{g fluoresceína mL}^{-1}$). Ecologicamente, representam ambientes de referência, nos quais há equilíbrio entre estabilização e mineralização da matéria orgânica (Carneiro *et al.*, 2024; Chaer *et al.*, 2023).

Os perfis situados no Q4 embora apresentem reduzidos teores de carbono, demonstram sinais de regeneração biológica, com a biota restabelecendo processos enzimáticos e estruturais que podem favorecer o acúmulo futuro de carbono e a recuperação da qualidade ecológica do solo (Mendes *et al.*, 2023). Estes perfis também obtiveram teores médios de CPOx moderados ($611,46 \text{ mg kg}^{-1}$), contudo, apresentaram elevada atividade da FDA ($10,27 \text{ } \mu\text{g fluoresceína mL}^{-1}$), indicando reativação significativa da atividade microbiana.

Os Neossolos reunidos no Q2 mantêm teores elevados de carbono, mas a funcionalidade biológica moderada ($FDA = 9,06 \mu\text{g fluoresceína mL}^{-1}$) indica processos iniciais de degradação biológica, caracterizando sistemas em transição funcional. Esses solos acumulam carbono, mas sinalizam processos de degradação, nos quais a matéria orgânica não é plenamente incorporada às dinâmicas microbianas (Mendes *et al.*, 2024).

Todas as áreas de lavouras concentraram-se em Q3, juntamente com campos nativos e alguns pomares. Além dos reduzidos teores de COT e baixa AEM, estes solos apresentaram baixos teores de CPOx e de atividade da FDA. Esses resultados caracterizam solos biologicamente pouco ativos e com baixa capacidade de retenção de carbono (Mendes *et al.*, 2024). Ecologicamente, representam ambientes nos quais o uso intensivo compromete a funcionalidade biológica, reduzindo a saúde do solo (Luz *et al.*, 2019), comprometendo a fertilidade de longo prazo.

A aplicação do 4QM permitiu evidenciar gradientes claros de conservação e degradação. As áreas de mata nativa, por constituírem sistemas de maior biodiversidade e complexidade, foram alocadas no Q1, sendo consideradas como referência para solos saudáveis. A atividade microbiológica associada ao teor de COT refletiu a maior diversidade de raízes, importante fator de estabilidade e qualidade do solo. Isto sugere que à medida que aumenta a diversidade de espécies e cresce adição de matéria orgânica ao longo do tempo, os agroecossistemas são elevados a outro nível funcional (Anghinoni; Vezzani, 2021). Em contrapartida as lavouras representam o extremo oposto, sistemas de menor biodiversidade e aporte de resíduos, com redução da atividade biológica, representando sistemas com funcionalidades ecossistêmicas degradadas. Os quadrantes intermediários revelam zonas de transição, indicando redução na atividade biológica em Q2 e reativação microbiana com acúmulo parcial de carbono em Q4, sugerindo processos de regeneração estrutural e biológica (Carneiro *et al.*, 2024; Chaer *et al.*, 2023; Mendes *et al.*, 2023). A conversão de fitofisionomias florestais para áreas de cultivo intensivo impacta fortemente a estabilidade funcional do ecossistema, levando a perdas significativas de COS e reduzindo a atividade da biota do solo, alocando estes solos em quadrantes que expressam processos intensos de

degradação. Isto sugere que o uso predominante e o manejo do solo são fatores relevantes na transição entre quadrantes. Contudo, é fundamental salientar que a classificação gerada pelo 4QM possui natureza estritamente inferencial e funcional do *status* atual do solo, não representando uma linha do tempo ou uma trajetória cronológica direta de degradação ou recuperação. Em contraste, os solos do Q3, cultivados com lavouras e pomares, expressam solos biologicamente empobrecidos, nos quais o manejo intensivo compromete a ciclagem de nutrientes e a funcionalidade ecológica.

Essa distribuição confirma que a compactação e a redução da macroporosidade limitam a atividade da microbiota e a estabilização do COS, enquanto o maior aporte de resíduos orgânicos e diversidade radicular sustentam a saúde edáfica dos Neossolos. Neste contexto, os ambientes de mata nativa representam a referência de ambientes saudáveis e os sistemas agrícolas intensivos o principal desafio para a conservação dos Neossolos do bioma Pampa. O 4QM permite interpretar de forma simples o estado de saúde em Neossolos, a partir da compreensão de que a funcionalidade microbiológica é uma condição central na interação entre estrutura física, equilíbrio químico e diversidade de raízes.

5.5. Conclusões

A saúde e a qualidade dos Neossolos do bioma Pampa são fortemente impactadas pelos diferentes usos do solo, refletindo-se em padrões claros de carbono orgânico e atividade biológica. O carbono oxidável por permanganato (CPOx) e as atividades da β -glicosidase e arilsulfatase atuam como indicadores altamente sensíveis e marcadores precoces da dinâmica de degradação e resiliência biológica do solo.

As áreas de mata nativa constituem ambientes de referência ecológica, com maiores teores de COT e CPOx, elevada atividade enzimática e maior funcionalidade microbiológica. A integração destes indicadores evidencia que a sustentabilidade dos Neossolos depende da manutenção de atributos estruturais e da diversidade radicular.

Em sistemas de pomares, o não-revolvimento do solo associado ao uso de plantas de cobertura promove a diversificação radicular no perfil, permitindo que estes agroecossistemas sustentem níveis intermediários a elevados de atividade bioquímica e carbono orgânico. Em contraste, as lavouras caracterizam ambientes de menor complexidade ecológica, com redução dos valores de carbono e atividade biológica.

O pH atua como indicador ecológico central para os Neossolos de origem granítica. A funcionalidade microbiana e o acúmulo de carbono ativo são maximizados sob a faixa de pH entre 5,0 e 5,5. A calagem excessiva ($\text{pH} \geq 6,2$) reduz a biomassa microbiana (FDA) e inibe a atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, comprometendo severamente a saúde edáfica.

O método dos Quatro Quadrantes (4QM) consolida de forma integrada os atributos edáficos, oferecendo uma interpretação funcional e inferencial capaz de segregar solos de referência (Q1), solos em vias de degradação, com reduzida atividade biológica (Q2), solos degradados (Q3) e solos em regeneração biológica (Q4).

6. Considerações finais

Ao longo deste estudo consolidou-se a visão de que Neossolos Litólicos (RL) e Regolíticos (RR) compartilham a mesma matriz mineral arenosa e baixa evolução pedogenética, entretanto, possuem rotas funcionais distintas reguladas pela estrutura física do solo. Verificou-se que as duas classes de Neossolos possuem porosidades significativamente diferentes. Enquanto nos RL predomina a microporosidade, nos RR a macroporosidade é significativamente superior. Essa diferença estrutural condiciona rotas distintas de estabilização da MOS, refletindo trajetórias pedogenéticas próprias.

Os RL, condicionados por uma maior proporção de microporos, estabelecem um ambiente edáfico que restringe a circulação de gases e água, retardando a degradação microbiana imediata. Isso resulta em maior acúmulo de compostos hidrofóbicos alifáticos (ceras e lipídios) e maior proteção organomineral na camada superficial, o que se traduz em maior fertilidade natural (CTC e teores de Ca) em comparação aos RR.

Os RR, por sua vez, têm sua dinâmica governada pela macroporosidade. O maior fluxo de oxigênio e água acelera a mineralização da fração particulada (MOP) na superfície, gerando um *pool* mais lábil. Contudo, a maior porosidade e profundidade do regolito permitem o transporte vertical do carbono, conservando assinaturas isotópicas antigas e polissacarídeos estáveis em horizontes saprolíticos profundos, atuando como verdadeiros arquivos paleoambientais.

Além disso, verificou-se, que RL e RR situam-se em distintas posições no relevo, com diferenças altimétricas estatisticamente significativas. Os RL ocupam as posições mais elevadas na paisagem, enquanto os RR situam-se no sopé da encosta. As diferenças estruturais vinculadas a porosidade e topografia, condicionam processos de dinâmica e estabilização da MOS completamente diferentes entre as duas classes de Neossolos. Os RR revelam maior profundidade, sistemas radiculares diversificados e maior condensação aromática, funcionando como arquivos isotópicos paleoambientais da expansão florestal ocorrida no Holoceno. Já os RL preservam características herdadas de ambientes campestres áridos do Quaternário, com retenção seletiva de compostos hidrofóbicos e memória radicular associada a gramíneas. Essa oposição

evidencia que a porosidade guarda a marca das trajetórias paleovegetacionais do bioma Pampa.

A acidez ativa (pH) emergiu como um dos indicadores ecológicos mais relevantes desses solos. Os dados demonstram que, para Neossolos de origem granítica, a acidez moderada não é um fator impeditivo para a funcionalidade biológica. Ambientes naturais e conservados sob matas e campos nativos apresentam maior acidez natural ($\text{pH} \leq 5,5$), mas sustentam os maiores teores de carbono (COT e CPOx), além de picos de atividade da enzima arilsulfatase e da biomassa microbiana total (FDA).

Por outro lado, apresenta-se evidências robustas de que a conversão desses solos para usos intensivos sob o manejo convencional altera drasticamente essa estabilidade biológica. Nas áreas de lavoura, o revolvimento frequente decompõe os estoques de carbono e reduz a atividade microbiológica. Mesmo quando essas áreas recebem calagem corretiva que eleva o pH para patamares teoricamente favoráveis (5,6 a 6,1), os danos físicos de compactação e a perda de macroporosidade restringem a difusão de oxigênio e a colonização microbiana, anulando os benefícios químicos da neutralização da acidez e alocando-os no Quadrante Degradado (Q3) do modelo de quatro quadrantes (4QM). Em pomares de pêssego, o não revolvimento do solo e a presença de plantas de cobertura nas entrelinhas contribuem na preservação da saúde edáfica. Esses sistemas perenes com aportes radiculares diversos mantêm teores intermediários a elevados de MOS, posicionando-se frequentemente em zonas estáveis (Q1) ou regenerativas (Q4). Contudo, alerta-se para os riscos da calagem excessiva nesses agroecossistemas: quando o pH atinge níveis próximos à neutralidade ($\text{pH} = 6,2$, como em P4), ocorre redução na atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, além de perdas acentuadas de FDA e COT. O equilíbrio sustentável nesses solos frágeis é alcançado mantendo-se a reação do solo ligeiramente ácida (faixa ideal de pH entre 5,0 e 5,5), onde a estrutura física protege a microbiota sem os efeitos negativos da elevada acidez ou da alcalinização induzida por supercalagem.

7. Perspectivas futuras

O conjunto de evidências verificadas neste estudo indicam que Neossolos Regolíticos foram formados a partir do avanço das formações florestais em altas latitudes. Portanto, levanta-se a hipótese de que as “línguas” formadas nos horizontes saprolíticos, preenchidas por material argiloso, frequentemente observadas nos horizontes saprolíticos desses perfis de solo, constituem “impressões” biogênicas (memórias radiculares) deixadas em subsuperfície por antigas raízes pivotantes de espécies arbóreas. Essas estruturas testemunham o avanço das matas nativas sobre as formações campestres que ocuparam a região a partir do holoceno superior.

Constatou-se que o desenvolvimento vertical e o grau de diferenciação desses perfis são fortemente condicionados pela dinâmica do relevo do ESRG. Enquanto os Neossolos Regolíticos posicionados em porções de baixa encosta são mais profundos, estáveis e homogêneos (como o perfil P8), aqueles localizados em cotas altimétricas superiores (perfis P3, P9 e P17), apresentam uma organização estrutural de horizontes discrepante e marcadamente heterogênea (Figura 7.1). Essa distribuição espacial dos perfis ao longo da vertente revela que o desenvolvimento dos Neossolos Regolíticos na região ESRG reflete o avanço centrífugo das formações florestais a partir da rede hidrológica preexistente. Os fundos de vale e as baixas encostas funcionaram como refúgios ecológicos úmidos durante os períodos mais secos do Holoceno. Com o estabelecimento do clima atual, mais úmido e quente, a expansão florestal progrediu das baixas altitudes em direção às encostas superiores. Consequentemente, a baixa encosta (perfil P8) experimentou um período consideravelmente mais longo de pedogênese mediada por raízes arbóreas profundas, o que resultou em perfis intemperizados de forma mais homogênea e profunda. Por outro lado, as “línguas” saprolíticas preenchidas por argila nas cotas altimétricas superiores (perfis P3, P9 e P17) testemunham a frente pioneira e mais recente dessa colonização biológica, registrando o estágio inicial de transição e fraturamento do regolito granítico pelas espécies florestais em expansão.

Figura 7.1 – Imagens fotográficas dos perfis de Neossolos Regolíticos P8, P9 (mata nativa), P3 (lavoura/pomar) e P17 (pomar)



P8 – altitude 67 m, profundidade >80 cm, relevo ondulado



P9 – altitude 119 m, profundidade >80 cm, relevo forte ondulado



P3 – altitude 101 m; profundidade >90 cm, relevo forte ondulado



P17 – altitude 136 m, profundidade >80 cm, relevo ondulado

Fonte: elaborado pelo autor

Mesmo em Neossolos Litólicos a penetração das raízes é evidenciada nos horizontes saprolíticos (Figura 7.2). Neles a memória radicular ancestral *impressa* no perfil é de raízes finas e densas, típicas de gramíneas e herbáceas, características de formações campestres do Pampa nativo. Contudo, a ocupação histórica dessas terras pela agricultura familiar e a recente introdução de cultivos perenes ou de silvicultura, têm sobreposto registros antrópicos recentes à pedogênese original. Essa dinâmica de transição de uso é ilustrada na Figura 7.3 que evidencia uma dessas feições argilosas (*línguas*) em um Neossolo Litólico (perfil P15), o qual foi submetido ao cultivo de eucaliptos por cerca de 100 anos e recentemente, convertido para pomar de pêssegos.

Sob esta ótica evolutiva, os Neossolos do bioma Pampa não devem ser interpretados como solos jovens e rasos, mas sim como sistemas pedológicos dinâmicos cuja assinatura biogeoquímica resulta da sobreposição cronológica entre heranças campestres ancestrais e a expansão florestal subsequente. Nos Neossolos Regolíticos, essa evolução culminou em perfis mais profundos e homogêneos, enquanto nos RL a memória campestre persiste em horizontes rasos e saprolíticos. Essa leitura reforça que os Neossolos são registros pedológicos da transição ecológica do Pampa, constituindo testemunhos da expansão florestal em altas latitudes do sul do Brasil.

Como desdobramento desta tese, propõe-se que estudos pedogenéticos futuros sejam delineados especificamente para contrastar a dinâmica biofísica de ecossistemas extremos, conduzindo amostragens em áreas de campo nativo, em Neossolos Litólicos e em remanescentes de mata nativa sobre Neossolos Regolíticos. Para superar as limitações amostrais e estatísticas identificadas no presente estudo recomenda-se:

- Estabelecer malhas amostrais espacialmente consistentes e expandir o número de repetições em campo, garantindo graus de liberdade robustos para a validação de modelos paramétricos de variância (ANOVA e Welch) e de consistência interna (ICC).
- Aplicar técnicas de micromorfologia do solo e microtomografia computadorizada de raios-X nas seções transversais das *línguas* saprolíticas para mapear a porosidade biogênica e os mecanismos de preenchimento mineral.

- Integrar análises de fitólitos e datação por Luminescência Opticamente Estimada (LOE) do material argiloso retido nessas feições biogênicas, permitindo datar a expansão cronológica da vegetação arbórea e consolidar os Neossolos como termômetros biogeográficos das mudanças climáticas quaternárias no sul do Brasil.

Figura 7.2 – Imagens fotográficas dos perfis P1 e P6, de Neossolos Litólicos, sob lavoura/pomar



P1 – altitude 177 m; profundidade 40 cm, relevo ondulado



P6 – altitude 116 m; profundidade 40 cm, relevo ondulado

Figura 7.3 – Imagens fotográficas do perfil P15, Neossolo Litólico sob pomar e, em destaque, a base do tronco (cepo) de antigos eucaliptos, junto ao solo, a qual conecta-se diretamente ao sistema radicular subterrâneo



Fonte: elaborado pelo autor

Referências

- ACCOE, F.; BOECK, P.; VAN CLEEMPOT, O.; HOFMAN, G.; ZHANG, Y.; LI, R.; GUANXIONG, C. Evolution of the $\delta^{13}\text{C}$ signature related to total carbon contents and carbon decomposition rate constants in a soil profile under grassland. **Rapid Communications in Mass Spectrometry**, v.16, p. 2184-2189, 2002. <https://doi.org/10.1002/rcm.767>
- ADAM, G.; DUNCAN, H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, n. 7–8, p. 943-951, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3).
- ADETUNJI, A.T.; LEWU, F.B.; MULIDZI, R.; NCUBE, B. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 3, p.794-807, 2017. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017000300018>
- AGUIAR, M.I.; RIBEIRO, L.P.D.; RAMOS, A.P.; CARDOSO, E.L. Soil characterization by near-infrared spectroscopy and principal component analysis. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 52, n. 1, e20196825, 2021. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210004>
- ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J.A.; GATIBONI, L.C.; ROVEDDER, A.P.; COSTA, F.S. Fragilidade de solos: uma análise conceitual, ocorrência e importância agrícola para o Brasil. In: CASTRO, S.S.; HERNANI, L.C. (ed. tec.). **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 25-50. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1039217>
- ALMEIDA, A.V.D.L.; CORRÊA, M.M.; LIMA, J.R.S.; SOUZA, E.S.; SANTORO, K.R.; ANTONINO, A.C.D. Atributos físicos, macro e micromorfológicos de Neossolos Regolíticos no agreste meridional de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p. 1235-1246, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140757>
- ALVES, E.A.C. Análise espaço temporal das coberturas campestres do bioma Pampa: reflexões sobre a sua degradação. **Geopauta**, v. 8, e15647, 2024. <https://www.scielo.br/j/geop/>
- AMELUNG, W.; BOSSIO, D.; VRIES, W.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; AMUNDSON, R.; BOL, R.; COLLINS, C.; LAL, R.; LEIFELD, J.; MINASNY, B.; PAN, G.; PAUSTIAN, K.; RUMPEL, C.; SANDERMAN, J.; GROENIGEN, J.W.; MOONEY, S.; WESEMAEL, B.; WANDER, M.; CHABBI, A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. **Nature Communications**, v. 11, n. 5427, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>

ANDRADE, B.A.; DRÖSE, W.; AGUIAR, C.A.; AIRES, E.T.; ALVARES, D.J. *et al.* 12,500+ and counting: biodiversity of the Brazilian Pampa. **Frontiers of Biogeography**, v. 15, n. 2, e59288, 2023. <https://doi.org/10.21425/F5FBG59288>

ANGERS, D.A.; ARROUAYS, D.; CARDINAEL, R.; CHENU, C.; CORBEELS, M.; DEMENOIS, J.; FARRELL, M.; MARTIN, M.; MINASNY, B.; RECOUS, S.; SIX, J. A well-established fact: Rapid mineralization of organic inputs is an important factor for soil carbon sequestration. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 3, 5 p. 2022. <https://doi.org/10.1111/ejss.13242>

ANGERS, D.A.; ARROUAYS, D.; SABY, N.P.A.; WALTER, C. Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils. **Soil Use and Management**, n. 27: p. 448-452, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00366.x>

ANGHINONI, I.; VEZZANI, F.M. Systemic Soil Fertility as product of system self-organization resulting from management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, n. e0210090, 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210090>

ANGST, G.; MUELLER, K.E.; CASTELLANO, M.J.; VOGEL, C.; WIESMEIER, M.; MUELLER, C.W. Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key. **Nature Communications**, v. 14, n. 2967, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38700-5>

ANJOS, L.H.C; JACOMINE, P.K.T.; SANTOS, H.G; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. In: KER, J.C.; CURTI, N.; SCHAEFER, C.E.G.R. VIDAL-TORRADO, P. (Eds.) **Pedologia: Fundamentos**. 1ª ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 301-343.

ARTES, R.; BARROSO, L.P. **Métodos multivariados de análise estatística**. São Paulo: Blucher. 2023. 534 p.

ARTZ, R.R.E.; CHAPMAN, S.J.; JEAN ROBERTSON, A.H.; POTTS, J.M.; LAGGOUN-DÉFARGE, F.; GOGO, S.; COMONT, L.; DISNAR, J.; FRANCEZ, A. FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands. **Soil Biology & Biochemistry**, n. 40, p. 515-527, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.09.019>

BACAR, T.; CHENG, Y.; WANG, Y.; KABOUL, K.; LOPES, N. The Effect of Vegetation Restoration in Soil Organic Carbon Storage. **Open Journal of Soil Science**, 12, 427-445, 2022. <https://doi.org/10.4236/ojss.2022.129017>

BALESDENT, J.; GIRARDIN, C.; MARIOTTI, A. Site-related ^{13}C of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. **Ecology**, v. 74, n. 6, p. 1713-1721, 1993. <http://www.jstor.org/stable/1939930?origin=JSTOR-pdf>

BARBOSA, L.S. **Atributos morfológicos, químicos e físico-hídricos de Neossolos Litólicos e Regolíticos da Região do Escudo Cristalino Sul-Riograndense**. 2022. 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

<https://www.guaiaica.ufpel.edu.br/handle/prefix/9107>

BARBOSA, J.Z.; POGGERE, G.; CORRÊA, R.S.; HUNGRIA, M.; MENDES, I.C. Soil enzymatic activity in Brazilian biomes under native vegetation and contrasting cropping and management. **Applied Soil Ecology**, v. 190, n. 105014, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105014>

BARDGETT, R.D.; MOMMER, L.; DE VRIES, F.T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 29, n. 12, p. 692-699, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2014.10.006>

BAYER, C.; MAFRA, A.L. Fundamentos do Manejo do Solo. *In*: BARROS, C.A.P.; NUNES, M.C.M.; BAYER, C.; MINELLA, J.P.G.; UHDE, L.T.; WEILER, D.A.; DRESCHER, M.S. **Manejo e conservação do solo e da água**. 1ª ed., Santa Maria, RS: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2023. p. 195-214.

BEARE, M.H.; COLEMAN, D.C.; CROSSLEY JR, D.A.; HENDRIX, P.F.; ODUM, E.P.A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. **Plant and Soil**, n. 170, p. 5-22, 1995.

<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02183051>

BEHLING, H. South and southeast Brazilian grasslands during Late Quaternary times: a synthesis. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 177, p. 19-27, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(01\)00349-2](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00349-2)

BEHLING, H.; PILLAR, V.D.; BAUERMANN, S.G. Dinâmica dos campos no sul do Brasil durante o Quaternário Tardio. *In*: PILLAR, V.D.; MÜLLER, S.C.; CASTILHOS, Z.M.S.; JACQUES, A.V.A. (org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p. 13-25.

<http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br/Arquivos/Livros/CamposSulinos.pdf>

BELARMINO, L.C.; NAVARRO-PABSDORF, M. Economia, polos de produção e comércio de pêssegos no Brasil e mundo. *In*: RASEIRA, M.C.B.; PEREIRA, J.F.M.; CARVALHO, F.L.C. (ed. tec.). **Cultivo do pessegueiro**, 2ª ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2022. p. 15-24. <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1149320/cultivo-do-pessegueiro>

BENDER, S.F.; WAGG, C.; VAN DER HEIJDEN, M.G.A. An Underground Revolution: Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 31, n. 6, p. 440-452, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>

BHATTACHARYYA, R.; RABBI, S.M.F.; ZHANG, Y.; YOUNG, I.M.; JONES, A.R.; DENNIS, P.G.; MENZIES, N.W.; KOPITKE, P.M.; DALAL, R.C. Soil organic carbon is significantly associated with the pore geometry, microbial diversity and enzyme activity of the macro-aggregates under different land uses. **Science of the Total Environment**, v. 778, p. 146286, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146286>

BIEDENBENDER, S.H.; McCLARAN, M.P.; QUIDEAU, S.A.; BOUTTON, T.W. Landscape patterns of vegetation change indicated by soil carbon isotope composition. **Geoderma**, v. 119, p. 69-83, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00234-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00234-9)

BISPO, D.F.A.; GUIMARÃES, D.V.; MARQUES, J.J.G.S.M; BENIAICH, A.; ACUÑA-GUZMAN, S.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N. Soil Organic Carbon as Response to Reforestation Age and Land Use Changes: A Qualitative Approach to Ecosystem Services. **Sustainability**. v. 15, n. 6863, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15086863>

BLAIR, J.B.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 46, p. 1459-1466, 1995. <https://doi.org/10.1071/AR9951459>

BORISOVER, M.; LADO, M.; LEVY, G.J. Modeling soil organic carbon content using mid-infrared absorbance spectra and a nonnegative MCR-ALS analysis. **Soil and Environmental Health**, v. 1, p. 100-123, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2024.100123>.

BOTELHO, M.R. **Gênese de horizontes subsuperficiais escuros de solos em área do Batólito Pelotas, RS**. 2011, 141 p. Tese (Doutorado em Ciências) Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022. <https://repositorio.ufpel.edu.br/handle/123456789/1131>

BOTELHO, M.R.; PINTO, L.F.S.; LIMA, A.C.R., NUNES, M.R. Caracterização e classificação de solos com horizontes subsuperficiais escuros derivados de rochas graníticas no Escudo Sul-Rio-Grandense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 38, p. 1066-1076, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400003>

BOUTTON, T.W.; NORDT, L.C.; ARCHER, S.R.; MIDWOOD, A.J.; CASAR, I. Stable carbon isotope ratios of soil organic matter and their potential use as indicators of palaeoclimate. *In: Proceedings of an International Symposium on Applications of Isotope Techniques in Studying Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere*. Viena: The International Atomic Energy Agency and Held, 1993, p.445-459. <https://inis.iaea.org/records/q6szz-czh50>

BURGUEÑO, L.E.T.; MARTINEZ, M.R.; MACIEL, K.F.K; MATOZO, L.F.; OLIVEIRA, J.R.; PINTO, L.F.S. Relação do carbono orgânico total (COT) com a Soma de Bases (S) em Neossolos localizados no Escudo Sul-Rio-Grandense. *In: ENCONTRO DO PÓS-GRADUAÇÃO UFPEL*, 26, 2024, Pelotas. **Anais...** Pelotas: UFPEL, 2024. 4 p. XXVI ENPOS. https://anais-siiepe.ufpel.edu.br/2024/CE_04962.pdf

CALDERÓN, F. J.; REEVES III, J.B.; COLLINS, H.P.; PAUL, E.A. Chemical Differences in Soil Organic Matter Fractions Determined by Diffuse-Reflectance Mid-Infrared Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 2, 2011.

CAMARGO, F.A.O.; SANTOS, G.A.; GUERRA, J.G.M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, 1ª ed. Porto Alegre, RS: Genesis, 1999. p. 27-40.

CARNEIRO, R.G.; MENDES, I.C.; FIGUEIREDO, C.C.; MALAQUIAS, J.V. A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. **Applied Soil Ecology**, n. 198, 105394, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105394>

CARVALHO, A.M.X. **Estatística experimental e observacional**: uma nova abordagem sobre os métodos clássicos. Uberlândia: Navegando Publicações. 2024. 282 p.

CARVALHO, M.L.; VANOLLI, B.S.; SCHIEBELBEIN, B.E.; BORBA, D.A.; LUZ, F.B.; CARDOSO, G.M.; BORTOLO, L.S.; MAROSTICA, M.E.M.; Souza, V.S. **Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo**. In: CHERUBIN, M.R. (org.). Piracicaba: ESALQ-USP, 126p, 2022. *E-book*. <https://doi.org/10.11606/9786589722151>

CEZAR, R.M.; VEZZANI, F.M.; JORIS, H.A.W.; BARTH, G.; KASCHUK, G. Crop rotation restructures soil microbial communities in Subtropical Oxisol, South Brazil. **Scientia Agricola**, v. 82; n. e20240134, 2025. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2024-0134>

CEZAR, R.M.; VEZZANI, F.M.; SCHWIDERKE, D.K.; GAIAD, S.; BROWN, G.G.; SEOANE, C.E.S.; FROUFE, L.C.M. Soil biological properties in multistrata successional agroforestry systems and in natural regeneration. **Agroforest System**, v.89, p. 1035-1047, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9833-7>

CHAEER, G.M.; MENDES, I.C.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V.; REIS JUNIOR, F.B.; OLIVEIRA, M.I.L. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, v. 183, n. 104742, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742>

CHAMBERS, L.G.; BHADHA, J.H.; MIRABITO, A.J.; HURST, N.R.; BREW, S.; BERKOWITZ, J.F.; NITSCH, C.K. Evaluating permanganate oxidizable carbon (POXC)'s potential for differentiating carbon pools in wetland soils. **Ecological Indicators**, v.167, n. 112624, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112624>

CHEN, S.; ARROUAYS, D.; ANGERS, D.A.; MARTINA, M.P.; WALTER, C. Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept. **Soil & Tillage Research**, v. 188, p. 53-58, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.001>

CHRISTY, I.; MOORE, A.; MYROLD, D.; KLEBER, M. A mechanistic inquiry into the applicability of permanganate oxidizable carbon as a soil health indicator. **Soil Science Society of America Journal**, v. 87, p. 1083-1095, 2023.

<https://doi.org/10.1002/saj2.20569>

CONCEIÇÃO, P.C.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; SANTOS, D.C. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 5, p. 794-800, 2014.

<https://doi.org/10.1590/S0103-84782014005000004>

CORDEIRO, J.L.P.; HASENACK, H. Cobertura vegetal atual do Rio Grande do Sul, Capítulo 23. In: PILLAR, V.P.; MÜLLER, S.C.; CASTILHOS, Z.M.S.; JACQUES, A.V.A. (ed.), **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 285-299. <https://antigo.mma.gov.br/publicacoes/biomas/category/64-pampa.html>

COTRUFO, M.F.; RANALLI, M.G.; HADDIX, M.L.; SIX, J.; LUGATO, E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v.12, p.989-994, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>

COTRUFO, M.F.; SOONG, J.L.; HORTON, A.J.; CAMPBELL, E.E.; HADDIX, M.L.; WALL, D.H.; PARTON, W.J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 776-779, 2015. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2520>.

COTRUFO, M.F.; WALLENSTEIN, M.D.; BOOT, C.M.; DENEFF, K.; PAUL, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>

CRUTZEN, P.J.; STOERMER, E.F. The Anthropocene. **IGBP Global Change Newsletter**, n.41, p.17-18, 2000.

[http://people.whitman.edu/Crutzen Stoermer 2000 Anthropocene](http://people.whitman.edu/Crutzen_Stoermer_2000_Anthropocene)

CULMAN, S.W.; SNAPP, S.S.; FREEMAN, M.A.; SCHIPANSKI, M.E.; BENISTON, J.; LAL, R.; DRINKWATER, L.E.; FRANZLUEBBERS, A.J.; GLOVER, J.D.; GRANDY, A.S.; LEE, J.; SIX, J.; MAUL, J.E.; MIRSKY, S.B.; SPARGO, J.T.; WANDER, M.M. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 2, p. 494-504, 2012. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>

DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; FLORES C.A. Mapeamento. Classificação e Potencial de Uso Agrícola dos Solos Arenosos do Bioma Pampa. In: PEDRON, F.A.; DALMOLIN, R.S.D. **Solos arenosos do Bioma Pampa brasileiro**. Santa Maria. RS: Editora da UFSM. 2019. p. 97-146.

DAUNORAS, J.; KAČERGIUS, A.; GUDIUKAITĖ, R. Role of soil microbiota enzymes in soil health and activity changes depending on climate change and the type of soil ecosystem. **Biology**, v. 13, n. 85, p. 1-39, 2024.

<https://doi.org/10.3390/biology13020085>.

DI, J.; FENG, W.; ZHANG, W.; CAI, A.; XU, M. Soil organic carbon saturation deficit under primary agricultural managements across major croplands in China. **Ecosystem Health and Sustainability**, v. 3, n. 7, 1364047, 2017.

<https://doi.org/10.1080/20964129.2017.1364047>

DICK, R.P.; BREAKWELL, D.P.; TURCO, R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators, Chapter 15, p. 247-271. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (ed.). **Methods of Soil Enzymology**. Madison: Soil Science Society of America (SSSA Book Series, v. 49), 1997. 410 p.

<https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c15>

DICK, D.P.; SANTOS, J.H.Z.; FERRANTI, E.M. Chemical characterization and infrared spectroscopy of soil organic matter from two Southern Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 29-39, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000100004>

DICK, D.P.; SILVA, L.B.; INDA, A.V.; KNICKER, H. Estudo comparativo da matéria orgânica de diferentes classes de solos de altitude do Sul do Brasil por técnicas convencionais e espectroscópicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2289-2296, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600008>

DIOCHON, A.; KELLMAN, L. Natural abundance measurements of ¹³C indicate increased deep soil carbon mineralization after forest disturbance. **Geophysical Research Letters**, v. 35, L14402, p. 1-5, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008GL034795>

DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 17, p. 1658-1670, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>

DONEDA, A.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J.; MIOLA, E.C.C.; GIACOMINI, D.A.; SCHIRMANN, J.; GONZATTO, R. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1714-1723, 2012.

<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/QPF8jdNnNzVkgCw6xJfbMvw/?format=pdf&lang=pt>

DUDEK, M.; KABAŁA, C.; ŁABAZ, B.; KRUPSKI, M. Application of Infrared Spectroscopy Techniques for Identification of Ancient Vegetation and Soil Change on Loess Areas. **Land**, v. 11, n. 1294, 2022. <https://doi.org/10.3390/land11081294>

ERKTAN, A.; OR, D.; SCHEU, S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions. **Soil Biology and Biochemistry**, v.148, n. 107876, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107876>

EVANGELOU, E.; GIOURGA, C. Identification of Soil Quality Factors and Indicators in Mediterranean Agro-Ecosystems. **Sustainability**, v. 16, n. 10717, 2024.
<https://doi.org/10.3390/su162310717>

FAN, X.; KONOLD, T.R. Statistical significance versus effect size. *In*: PETERSON, P.; BAKER, E.; MCGAW, B. **International Encyclopedia of Education**, 2010. p. 444-450.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044894-7.01368-3>

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global soil organic carbon sequestration potential map**. – SOCseq v.1.1. Technical report. Rome, 2022. 179 p. <https://doi.org/10.4060/cb9002en>

FENTON, O.; BONDI, G.; BRACKEN, C.J.; O’SULLIVAN, L.; LOPEZ-SANGIL, L.; TUOHY, P.; DALY, K. Relative and absolute difference in soil organic carbon stocks in grassland soils in Ireland: Impact of rock fragments, bulk density and calculation methods. **Geoderma Regional**, v. 36, e00769, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00769>

FEHRENBACH, A.; FLACH, C.W.; CORRÊA, E.A. Caracterização física, química e morfológica de Neossolos Regolíticos da porção leste do Escudo Sul Rio-Grandense. *In*: XVII SBGFA – Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. **Anais do...** Fortaleza, CE, 11 a 15 junho. p 1-12, 2019.
<https://www.researchgate.net/publication/340413669>

FERNANDES, F.A.; FERNANDES, A.H.B.M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico. 69). Corumbá: Embrapa Pantanal. 2009. 4 p.
http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/download.php?arq_pdf=COT69

FERNANDO, E.A.J.; SELVARAJ, M.; UGA, Y.; BUSCH, W.; BOWERS, H.; TOHME, J. Going deep: Roots, carbon, and analyzing subsoil carbon dynamics. **Molecular Plant**, v.17, n.1, p. 1-3, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.11.009>

FIGUEIRÊDO NETO, N.G.; SILVA, P.L.F.; OLIVEIRA, F.P.; MARTINS, A.F.; TAVARES, D.D.; CAMPOS, M.C.C. Qualidade físico-hídrica de um Neossolo Regolítico sob sistemas de produção integrados e convencionais. **Revista Agrogeoambiental**, v. 14, n. e20221721, 2022. <https://doi.org/10.18406/2316-1817v14n120221721>

FLUCK, A.C.; SCHAFHÄUSER JÚNIOR, J.; ALFAYA JÚNIOR, H.; COSTA, O.A.D.; FARIAS, G.D.; SCHEIBLER, R.B.; RIZZO, F.A.; MANFRON, J.A.S.; FIOREZE, V.I.; RÖSLER, D.C. Composição química da forragem e do ensilado de azevém anual em função de diferentes tempos de secagem e estádios fenológicos. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 70, n. 6, p. 1979-1987, 2018
<http://dx.doi.org/10.1590/1678-4162-9981>

FOWLER, A.F.; BASSO, B.; MILLAR, N.; BRINTON, W.F. A simple soil mass correction for a more accurate determination of soil carbon stock changes. **Nature Science Reports**, v. 13, n. 2242, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29289-2>

FREIXO, A.A.; CANELLAS, L.P.; MACHADO, P.L.O.A. Propriedades espectrais da matéria orgânica leve-livre e leve intra-agregado de dois latossolos sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 26, p. 445-453, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200018>

FULTZ, L.M.; MOORE-KUCERA, J.; CALDERÓN, F.; ACOSTA-MARTÍNEZ, V. Using Fourier-Transform Mid-infrared spectroscopy to distinguish soil organic matter composition dynamics in aggregate fractions of two agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 1940-1948, 2015. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.04.0161>

GAMBOA, C.H.; VEZZANI, F.M.; KASCHUK, G.; FAVARETTO, N.; COBOS, J.Y.G.; Costa, G.A. Soil-Root Dynamics in Maize-Beans-Eggplant Intercropping System under Organic Management in a Subtropical Region. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 1480-1490, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00227-9>

GAO, F.; CUI, X.; CHEN, M.; SANG, Y. Forest conversion changes soil particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon via plant inputs and microbial processes. **Forests**, v.14, n.1234, 2023. <https://doi.org/10.3390/f14061234>

GEORGIU, K.; DOETTERL, S.; ANGERS, D.; CHAMPINY, R.E.; COTRUFO, M. F.; CRAIG, M.E.; DOETTERL, S.; GRANDY, A.S.; LAVALLEE, J.M.; LIN, Y.; LUGATO, E.; POEPLAU, C.; ROCCI, K.S.; SCHWEIZER, S.A.; SIX, J.; WIEDER, W.R. Soil carbon saturation: what do we really know? **Global Change Biology**; n.31, e70197, 2025. <https://doi.org/10.1111/gcb.70197>

GOMES, M.F.; VASCONCELOS, S.S.; VIANA-JUNIOR, A.B.; COSTA, A.N.M.; BARROS, P.C.; RYOHEI KATO, O.; CASTELLANI, D.C. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 15, p. 4313-4326, 2021. <https://doi.org/10.1002/ldr.4038>

GOOGLE. **Gemini** (versão de junho de 2026). Modelo de linguagem de grande escala. <https://gemini.google.com/>

GRAEUB, B.E.; CHAPPELL, M.J.; WITTMAN, H.; LEDERMANN, S.; KERR, R.B.; GEMMILL-HERREN, B. The State of Family Farms in the World. **World Development**, v. 87, p. 1-15, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.05.012>

GREGORY, P.J. Are plant roots only “in” soil or are they “of” it? Roots, soil formation and function. **European Journal of Soil Science**, v. 73, p. 1-25, e13219, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13219>

GUILLAUME, T.; MAKOWSKI, D.; LIBOHOVA, Z.; BRAGAZZA, L.; SALLAKU, F.; SINAJ, S.; Soil organic carbon saturation in cropland-grassland systems: Storage potential and soil quality, **Geoderma**, v. 406, n. 115529, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115529>

GURMESA, G.A.; HOBBIE, E.A.; ZHANG, S.; WANG, A.; ZHU, F.; ZHU, W.; KOKA, K.; YOH, M.; WANG, C.; ZHANG, Q.; FANG, Y. Natural ¹⁵N abundance of ammonium and nitrate in soil profiles: new insights into forest ecosystem nitrogen saturation.

Ecosphere, v. 13, n. 3, e3998. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3998>

HABERHAUER, G.; FEIGL, B.; GERZABEK, M.H.; CERRI, C. FT-IR Spectroscopy of Organic Matter in Tropical Soils: Changes Induced through Deforestation. **Applied Spectroscopy**, v. 54, n. 2, 2000. <https://doi.org/10.1366/0003702001949131>

HABERHAUER, G.; RAFFERTY, B.; STREBL, F.; GERZABEK, M.H. Comparison of the composition of forest soil litter derived from three different sites at various decompositional stages using FTIR spectroscopy. **Geoderma**, v. 83, n. 3-4, p. 331-342, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00008-1)

HADDIX, M.L.; GREGORICH, E.G.; HELGASON, B.L.; BENJAMIN, H.J.; ELLERT, H.; COTRUFO, M.F. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. **Geoderma**, v. 363, n. 114160, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160>

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analyses. **Paleontologia Electronica**, v. 4, n. 1, 9 p. 2001. <https://past.en.lo4d.com/windows>

HARTMANN, M.; SIX, J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 4, p. 123-135, 2023. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>

HAYES, M.H.B.; SWIFT, R.S. An appreciation of the contribution of Frank Stevenson to the advancement of studies of soil organic matter and humic substances. **Journal of Soils and Sediments**, n. 18, p. 1212-1231. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1636-6>

HELLER, C.; ELLERBROCK, R.H.; ROßKOPF, N.; KLINGENFUß, C.; ZEITZ, J. Soil organic matter characterization of temperate peatland soil with FTIR-spectroscopy: effects of mire type and drainage intensity. **European Journal of Soil Science**, v. 66, p. 847-858, 2015. <https://doi.org/10.1111/ejss.12279>

HOREL, A.; TÓTH, E.; GELYBÓ, G.; KÁSA, I.; BAKACSI, Z.; FARKAS, C. Effects of land use and management on soil hydraulic properties. **Open Geoscience**, n. 1, p. 742-754, 2015. <https://doi.org/10.1515/geo-2015-0053>

HU, W.; CICHOTA, R.; BEARE, M.; MÜLLER, K.; DREWRY, J.; EGER, A. Soil structural vulnerability: Critical review and conceptual development. **Geoderma**, v. 430, p. 1-13, 116346, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116346>

HURISSO, T.T., CULMAN, S.W., HORWATH, W.R., WADE, J., CASS, D., BENISTON, J.W., BOWLES, T.M., GRANDY, A.S., FRANZLUEBBERS, A.J., SCHIPANSKI, M.E., LUCAS, S.T.; UGARTE, C.M. Comparison of permanganate-oxidizable carbon and mineralizable carbon for assessment of organic matter stabilization and mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, p. 1352-1364, 2016. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.04.0106>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Biomass e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil**: compatível com a escala 1:250 000. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2019. 168 p. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**: características gerais das produções agropecuária e extrativista, segundo a cor ou raça do produtor e recortes territoriais específicos. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de pêssego**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/pessegue/rs>

IUSS WORKING GROUP WRB. **World Reference Base for Soil Resources 2014**: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. [s.l.]: FAO. 2015. <https://openknowledge.fao.org/>

JACKSON, R.B.; LAJTHA, K.; CROW, S.E.; HUGELIUS, G.; KRAMER, M.G.; PIÑEIRO, G. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 48, p. 419-445, 2017. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234>.

JURINITZ, C.F.; JARENKOW, J.A. Estrutura do componente arbóreo de uma floresta estacional na Serra do Sudeste, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 26, n.4, p. 475-487, 2003. <https://pdfs.semanticscholar.org/2044/>

KALLENBACH, C.M.; FREY, S.D.; GRANDY, A. S. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its eco-physiological controls. **Nature Communications**, v. 7, n. 13630, 2016. <https://doi.org/10.1038/ncomms13630>

KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (Pedogênese), Capítulo VII. In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C.E.G.R. VIDAL-TORRADO, P. (ed.) **Pedologia: fundamentos**. 1ª ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 207-302.

- KAYLER, Z.E.; KAISER, M.; GESSLER, A.; ELLERBROCK, R.H.; SOMMER, M. Application of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isotopic signatures of organic matter fractions sequentially separated from adjacent arable and forest soils to identify carbon stabilization mechanisms. **Biogeosciences**, v. 8, p. 2895-2906, 2011. <https://doi.org/10.5194/bg-8-2895-2011>
- KIRKELS, F.M.S.A., DE BOER, H.J., CONCHA HERNÁNDEZ, P., MARTES, C.R.T., VAN DER MEER, M.T.J., BASU, S., USMAN, M.O., E PETERSE, F. Carbon isotopic ratios of modern C3 and C4 vegetation on the Indian peninsula and changes along the plant–soil–river continuum – implications for vegetation reconstructions, **Biogeosciences**, v. 19, p. 4107-4127, 2022. <https://doi.org/10.5194/bg-19-4107-2022>
- KLEBER, M.; NICO, P.S.; PLANTE, A.; FILLEY, T.; KRAMER, M.; SWANSTON, C.; SOLLINS, P. Old and stable soil organic matter is not necessarily chemically recalcitrant: implications for modeling concepts and temperature sensitivity. **Global Change Biology**, v. 17, n. 2, p. 1097-1107, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02278.x>
- KLEBER, M.; SOLLINS, P.; SUTTON, R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. **Biogeochemistry**, v. 85, n. 1, p. 9-24, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9103-5>
- KRÜGER, N.; DON, A.; FINN, D.R. Soil depth gradients of organic carbon-13 – A review on drivers and processes. **Plant and Soil**, v. 495, p. 113-136, 2024. <https://doi.org/10.1007/s1104-023-06328-5>
- KUMAR, A.; DORODNIKOV, M.; SPLETTSTÖßER, T.; KUZYAKOV, Y.; PAUSCH, J. Effects of maize roots on aggregate stability and enzyme activities in soil. **Geoderma**, v. 306, p. 50-57, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.007>
- KUZYAKOV, Y.; BLAGODATSKAYA, E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. **Soil Biology and Biochemistry**, v.83, p. 184-199, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025>
- LAL, R.; NEGASSA, W.C.; LORENZ, K. Carbon sequestration in soil. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, n. 15, 79-86, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.09.002>
- LANGE, M.; EISENHAEUER, N.; SIERRA, C.A.; BESSLER, H.; ENGELS, C.; GRIFFITHS, R. MELLADO-VÁZQUEZ, P.G.; MALIK, A.A.; ROY, J.; SCHEU, S.; STEINBEISS, S.; THOMSON, B.C.; TRUMBORE, S.E.; GLEIXNER, G. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nature Communications**, v.6, n. 6707, p. 1-8, 2015. <https://doi.org/10.1038/ncomms7707>

LAVALLEE; J.M.; CONANT; R.T.; PAUL; E.A.; COTRUFO; M.F. Incorporation of shoot versus root-derived ^{13}C and ^{15}N into mineral-associated organic matter fractions: results of a soil slurry incubation with dual-labelled plant material. **Biogeochemistry**. 137, 379-393, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0428-z>

LAVALLEE. J.M.; SOONG, J.L.; COTRUFO; M.F. 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. 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, p. 60-68, 2015. <https://doi.org/10.1038/nature16069>

LEITE, H.M.F.; CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A.; MENDES, L.W.; MORAES, L.N.; GROTO, R.M.T.; ARAUJO, F.F.; PEREIRA, A.P.A.; MELO, V.M.M.; ARAUJO, A.S.F. Cover crops shape the soil bacterial community in a tropical soil under no-till. **Applied Soil Ecology**, v. 168, n. 104166, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104166>

LEMONS, L.S. **Estimativa de tolerância de perdas de solo do alto curso da bacia hidrográfica do arroio Quilombo – Pelotas/Canguçu – RS**. 2021. 85 p. Monografia (Bacharelado em Geografia). Instituto de Ciências Humanas, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021. <https://pergamum.ufpel.edu.br/pergamumweb/>

LIAO, X.; ZHAO, J.; MAGURA, T.; ZHANG, W.; HU, P.; XIAO, D.; LI, J.; ZHANG, J.; WANG, K. Strengthened trophic interactions in soil micro-food webs stimulate soil carbon storage under vegetation restoration. **Journal of Applied Ecology**, v. 62, n. 3, p. 1-18, 2025. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.7015>

LIMA, C.L.R.; KAISER, D.R. Estrutura e agregação do solo. Capítulo III. In: ALBUQUERQUE, J.A.; GUBIANI, P.I. (org.) **Física do solo**. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2023. p. 71-102.

LISBOA, B.B.; VARGAS, L.K.; SILVEIRA, A.O.; MARTINS, A.F.; SELBACH, P.A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 33-44, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000100004>

LIU, D.; LI, S.; ZHU, W.; WANG, Y.; ZHANG, S.; FANG, Y. Storage and stability of soil organic carbon in two temperate forests in Northeastern China. **Land**, v.12, n.1019, 2023. <https://doi.org/10.3390/land12051019>

LOCATELLI, J.L.; LIMA, R.P.; SANTOS, R.S.; CHERUBIN, M.R.; CREAMER, R.E.; CERRI, C.E.P.; Soil strength and structural stability are mediated by soil organic matter composition in agricultural expansion areas of the Brazilian Cerrado biome. **Agronomy**, v. 13, n. 71, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010071>

LOPES, A.A.C.; SOUSA, D.M.G.; CHAER, G.M.; REIS JUNIOR, F.B.; GOEDERT, W.J.; MENDES, I.C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 2, p. 461-472, 2013. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; GIÁCOMO, S.G.; PERIN, A.; ANJOS, L.H.C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000022>

LOURENZI, C.R.; SOARES, C.R.F.S.; ROS, C.O.; BRUNETTO, G.; FERREIRA, P.A.A. Ciclos biogeoquímicos de micronutrientes. Capítulo 12. *In*: TIECHER, T.; LOURENZI, C.R.; MARTINS, A.P.; BRUNETTO, G.; CARLOS, F.S.; SILVA, L.S.; ESCOTEGUY, P.A.V. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas**. Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 279-311.

LOWDERA, S.K.; SÁNCHEZ, M.V.; BERTINI, R. Which farms feed the world and has farmland become more concentrated? **World Development**, v.142, n. 105455, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105455>

LUCAS, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.; VETTERLEIN, D. Soil structure formation along an agricultural chronosequence. **Geoderma**, v. 350, p. 61-72, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.041>

LUZ, F.B.; SILVA, V.R.; MALLMANN, F.J.K.; PIRES, C.A.B.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; CHERUBIN, M.R. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 281, n. 1, p. 100-110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.006>

MACHADO, J.M.; JOHNSON, J.C.; TORNQUIST, C.G.; TABORDA, E.P.; WINCK, B.R. Soil carbon stocks as affected by land-use changes across the Pampa of southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. 1-15, e0230124, 2024. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230124>

MACHADO, L.V.; RANGEL, O.J.P.; MENDONÇA, E.S.; MACHADO, F.V.; FERRARI, J.L. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 289-299, 2014. <https://sbicafe.ufv.br/items/05e7af32-7664-4990-b3a4-ec9ae625cd07>

MARISCAL-SANCHO, I.; BALL, B.; MCKENZIE, B. Influence of Tillage Practices, Organic Manures and Extrinsic Factors on β -Glucosidase Activity: The Final Step of Cellulose Hydrolysis. **Soil Systems**, v. 2, n. 21, 2018. <https://doi.org/10.3390/soilsystems2020021>

MARTINS, D.; GONÇALVES, C.G.; SILVA JUNIOR, A.C. Coberturas mortas de inverno e controle químico sobre plantas daninhas na cultura do milho. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 4, p. 649-657, 2016.

<https://www.scielo.br/j/rca/a/4YQBSJtV6fHHF84b6sfmm4c>

MAYES, M.; MARIN-SPIOTTA, E.; SZYMANSKI, L.; ERDOĞAN, M.A.; OZDOĞAN, M.; CLAYTON, M. Soil type mediates effects of land use on soil carbon and nitrogen in the Konya Basin, Turkey, **Geoderma**, v. 232–234, p. 517-527, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.002>

MEDEIROS, P.S.C.; PEDRON, F.A.; STÜRMER, S.L.C.; RODRIGUES, M.F.; AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D. Caracterização de Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos do RS e análise do seu potencial agrícola. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Gramado, RS, 05-10 agosto de 2007. **Anais...** Gramado, RS: SBCS, 5 p., 2007.

<https://www.researchgate.net/publication/267232084>

MENDES, I.C.; CHAER, G.M.; REIS JUNIOR, F.B.; OLIVEIRA, M.I.L.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V. Fazendas de referência para a implementação do modelo de quatro quadrantes na avaliação de tendências do carbono do solo pela tecnologia BioAS tendências de ganho ou perda de C no solo. **Documentos 403**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2023. 40 p.

<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1154741/>

MENDES, I.C.; CHAER, G.M.; DOS REIS JUNIOR, F.B.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V.; DE OLIVEIRA, M.I.L.; NOGUEIRA, M.A.; HUNGRIA, M. Soil Bioanalysis (SoilBio): A Sensitive, Calibrated, and Simple Assessment of Soil Health for Brazil. In: MENDES, I.C.; CHERUBIN, M.R. (ed.). **Soil Health Series: Soil health and sustainable agriculture in Brazil**, v. 3, 2024. <https://doi.org/10.1002/9780891187448.ch10>

MENDES, I.C.; FERNANDES, M.F.; CHAER, G.M.; REIS JUNIOR, F.B. Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. **Plant Soil**, v. 359, p. 183-195, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1195-6>

MENDES, I.C.; SOUZA, L.M.; SOUSA, D.M.G.; LOPES, A.A.C.; REIS JUNIOR, F.B.; LACERDA, M.P.C.; MALAQUIAS, J.V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: the FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85-93, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>

MENDONÇA, E.S.; MATOS, E.S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. 2ª ed. Viçosa, MG: UFV-Gefert. 2017. 221 p.

MENEZES, R.S.C.; SILVA, T.O. Mudanças na fertilidade de um Neossolo Regolítico após seis anos de adubação orgânica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 251-257, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300005>

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Copilot**. Redmond, WA: Microsoft, 2023. Acesso: junho/2026. <https://copilot.microsoft.com>

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; MOURA-BUENO, J.M. Classificação taxonômica de solos. *In*: GIASSON, E.; LOSS, A.; MIGUEL, P., SCHENATTO, R.B. **Pedologia**: estudo dos solos do RS e SC. Santa Maria, RS: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2024. p. 141-177.

MIKHA, M.M.; MARAKE, M.V. Soil organic matter fractions and carbon distribution under different management in Lesotho, southern Africa. **Soil Science Society American Journal**. n.87, p. 140-155, 2023. <https://doi.org/10.1002/saj2.20471>

MOREIRA F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica o solo**. 2º ed. atual. e ampl. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MOSCATELLI, M.C.; LAGOMARSINO, A.; GARZILLO, A.M.V.; PIGNATARO, A.; GREGO, S. β -Glucosidase kinetic parameters as indicators of soil quality under conventional and organic cropping systems applying two analytical approaches. **Ecological Indicators**, v. 13, p. 322-327, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.031>

NABUURS, G.J.; MRABET, R.; HATAB, A.; BUSTAMANTE, M.; CLARK, H.; HAVLÍK, P.; HOUSE, J.; MBOW, C.; NINAN, K.N.; POPP, A.; ROE, S.; SOHNGEN, B.; TOWPRAYOON, S. Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). *In*: SHUKLA, P.R.; SKEA, J.; SLADE, R.; KHOURDAJIE, A.A.; VAN DIEMEN, R.; MCCOLLUM, D.; PATHAK, M.; SOME, S.; VYAS, P.; FRADERA, R.; BELKACEMI, M.; HASIJA, A.; LISBOA, G.; LUZ, S.; MALLEY, J. (ed.). **IPCC – Climate Change 2022**: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.009>

NANDIYANTO, A.B.D.; OKTIANI, R.; RAGADHITA, R. How to Read and Interpret FTIR Spectroscopy of Organic Material. **Indonesian Journal of Science & Technology**, v. 4, n. 1, 2019. <http://dx.doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>

NASCIMENTO, P.C.; SCHENATO, R.B.; MIGUEL, P.; GIASSON, E.; ROVEDDER, A.P.M.; LOSS, A.; HEBERLE, D.A. Solos do Brasil, com ênfase no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *In*: GIASSON, E.; LOSS, A.; MIGUEL, P., SCHENATTO, R.B. **Pedologia**: estudo dos solos do RS e SC. Santa Maria, RS: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2024. p. 257-298.

NOVOTNY, E.H.; MARTIN-NETO, L. Propriedades coloidais da Matéria Orgânica. *In*: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Ecossistemas tropicais e subtropicais, 1ª ed. Porto Alegre, RS: Genesis, 1999. p. 41-68.

NUZZO, A.; BUURMAN, P.; COZZOLINO, V. SPACCINI, R.; PICCOLO, A. Infrared spectra of soil organic matter under a primary vegetation sequence. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 7, n. 6, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0172-1>

O'BENG, A.S.; DUNNE, J.; GILTRAP, M.; TIAN, F. Soil organic matter carbon chemistry signatures, hydrophobicity and humification index following land use change in temperate peat soils. **Heliyon**, v. 9, n. e19347, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19347>

OLAYEMI. O.P.; KALLENBACH. C.M.; WALLENSTEIN. M.D. Distribution of soil organic matter fractions are altered with soil priming. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 164. n. 108494, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108494>

O'LEARY, M.H. Carbon isotopes in photosynthesis. **BioScience**, v. 38, n. 5, p. 328-336, 1988. <https://doi.org/10.2307/1310735>

OLIVEIRA, F.C.C.; BACON, A.; FOX, T.R.; JOKELA, E.J.; KANE, M.B.; MARTIN, T.A.; NOORMETS, A.; ROSS, C.W.; VOGEL, J.; MARKEWITZ, D. A regional assessment of permanganate oxidizable carbon for potential use as a soil health indicator in managed pine plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 521, n. 120423, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120423>.

OPENAI. **ChatGPT** (versão GPT-4o). [Software]. San Francisco, 2024. <https://chat.openai.com>. Acesso: junho/2026.

OR, D.; KELLER, T.; SCHLESINGER, W.H. Natural and managed soil structure: On the fragile scaffolding for soil functioning. **Soil & Tillage Research**, v. 208, n. 104912, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104912>

ORIGINLAB CORPORATION. **OriginPro 2016** (64-bit). Northampton, MA, USA: OriginLab Corporation. 2015. <https://www.originlab.com/>

OVERBECK, G.E.; MÜLLER, S.C.; FIDELIS, A.; PFADENHAUER, J.; PILLAR, V.P.; BLANCO, C.C.; BOLDRINI, I.I.; BOTH, R.; FORNECK, E.D. Os Campos Sulinos: um bioma negligenciado. Capítulo 2. *In*: PILLAR, V.P.; MÜLLER, S.C.; CASTILHOS, Z.M.S.; JACQUES, A.V.A. (ed.). **Campos Sulinos: Conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 26-41. <http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br/Arquivos/Livros/CamposSulinos.pdf>

PAGANI JUNIOR, A. **Modelagem da profundidade de Neossolos derivados de rochas graníticas do sul do Rio Grande do Sul**. 2022. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022. <https://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/9251>

PÄRNPUU, S.; ASTOVER, A.; TÕNUTARE, T.; PENU, P.; KAUER, K. Soil organic matter qualification with FTIR spectroscopy under different soil types in Estonia.

Geoderma Regional, v. 28, n. e00483, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00483>

PEDRON, F.A.; AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D. Alteração mineralógica de Neossolos em uma climo-litossequência no Planalto do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**. Santa Maria. v. 42. n. 3, p. 451-458, 2012.

<https://repositorio.usp.br/bitstream/handle/BDPI/39341>.

PEDRON, F.A.; AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D.; STÜRMER, S.L.K.; MENEZES, F.P. Morfologia e classificação taxonômica de Neossolos e saprolitos derivados de rochas vulcânicas da formação Serra Geral. no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 119-128, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100013>

PEDRON, F.A.; DALMOLIN, R.S.D.; FLORES, C.A. Gênese e morfologia dos solos arenosos do bioma Pampa. Capítulo 2. *In*: PEDRON, F.A.; DALMOLIN, R.S.D. (org.). **Solos Arenosos do Bioma Pampa Brasileiro**. Santa Maria. RS: Editora da UFSM. 2019. p. 51-95.

PEDRON, F.A.; FINK, J.R.; RODRIGUES, M.F.; AZEVEDO, A.C. Condutividade e Retenção de água em Neossolos e Saprolitos derivados de arenito. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1253-1262, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400018>

PEDRON, F.A.; MIGUEL, P.; BUENO, J.M.M.; DALMOLIN, R.S.D.; SUZUKI, L.E.A.S. Solos da encosta leste do Escudo Cristalino Gaúcho. *In*: FONTANA, A.; LOSS, A.; PEDRON, F.A. **Compêndio de solos do Brasil**, 1.^a ed., v. 2. Santa Maria, RS: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2025. P. 10-26 *E-book*. <https://www.sbcs-nrs.org.br/publicacoes/compendio-de-solos-do-brasil-volume-2>

PEREIRA, G.M.; FELIPE GUADAGNIN, F.; JELINEK, A.R.; CARON, F. Composição de elementos maiores de rochas fonte, solos e sedimentos derivados de rochas graníticas em clima subtropical úmido: contribuição aos estudos de proveniência sedimentar. **Geologia USP**, v. 21, n. 1, p. 3-21, 2021. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-163958>

PESSENDA, L.C.R.; OLIVEIRA, P.E.; MOFATTO, M.; MEDEIROS, V.B.; GARCIA, R.J.F.; ARAVENA, R.; BENDASSOLI, J.A.; LEITE, A.Z.; SAAD, A.R.; ETCHEBEHERE, M.L. The evolution of a tropical rainforest/grassland mosaic in southeastern Brazil since 28,000 14C yr BP based on carbon isotopes and pollen records. **Quaternary Research**, v. 71, n. 3, p. 437-452, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.01.008>

PHILBEN, M.; BOWERING, K.; PODREBARAC, F.A.; LAGANIÈRE, J.; EDWARD, K.; ZIEGLER, S.E. Enrichment of ^{13}C with depth in soil organic horizons is not explained by CO_2 or DOC losses during decomposition. **Geoderma**, v. 424, p. 116004, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116004>

PHILIPP, R.P.; CAMPOS, R.S. Geologia, Petrografia e Litogeoquímica dos Gnaisses Porto Alegre, RS, Brasil: Implicações Geotectônicas. **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 31, n. 2, p. 79-94, 2004. <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/19575>

PHILIPP, R.P.; MACHADO, R.; NARDI, L.V.S.; LAFON, J.M. O magmatismo granítico neoproterozóico do batólito pelotas no sul do brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 2, p. 277-290, 2002. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2002322277290>

PILLAR, V.D. Dinâmica dos campos no sul do Brasil durante o Quaternário Tardio. In: CLAUDINO-SALES, V. (org.). **Ecosistemas brasileiros: manejo e conservação**. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2003. p. 17-29.

POEPLAU, C.; DECHOW, R. The legacy of one hundred years of climate change for organic carbon stocks in global agricultural topsoils. **Scientific Reports**, v. 13, n. 7483, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34753-0>

PRESCOTT, C.E.; RUI, Y.; COTRUFO, M.F.; GRAYSTON, S.J. Managing plant surplus carbon to generate soil organic matter in regenerative agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 76, n. 6, 99A-104A, 2021. <https://doi.org/10.2489/jswc.2021.0920A>

PROSSER, J.A.; SPEIR, T.W.; STOTT, D.E. Soil oxidoreductases and FDA hydrolysis. In: DICK, R.P. (ed.) **Methods of soil enzymology**, v. 9, chapter 6, Madison, WI: Soil Science Society of America, 2011. p. 103-124. <https://doi.org/10.2136/sssabookser9.c6>

RAMOS, M.F. **Variabilidade de características físicas e hídricas do solo em pomares de pêssego com diferentes idades no município de Pelotas – RS**. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016. <https://repositorio.ufpel.edu.br/handle/prefix/3273>

RAZANAMAHANDRY, V.F.; DEWAELE, M.; GOVERS, G.; BROSENS, L.; CAMPFORTS, L.; JACOBS, L.; RAZAFIMBELO, T.; RAFOLISY, T.; BOUILLON, S. Stable isotope profiles of soil organic carbon in forested and grassland landscapes in the Lake Alaotra basin (Madagascar): insights in past vegetation changes. **Biogeosciences**, n.19, p. 3825-3841, 2022. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3825-2022>

REICHERT, J.M.; DALVAN, J.R.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência e Ambiente**. n. 27, p. 29-48, 2003. <https://cienciaeambiente.com.br/>

REINERT, D.J.; GUBIANI, P.I. Aeração do Solo. Capítulo VII. *In*: ALBUQUERQUE, J.A.; GUBIANI, P.I. (org.). **Física do Solo**. Santa Maria, RS: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2023. p. 179-194.

RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. *In*: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P.; RIBEIRO, J.F. (ed. téc.). **Cerrado: Ecologia e Flora** V.1. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 153-212.
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/570911/2/CERRADO-Ecologia-e-flora-VOL-1.pdf>

RICHARDSON, K.; STEFFEN, W.; LUCHT, W.; BENDTSEN, J.; CORNELL, S.E.; DONGES, J.F.; DRÜKE, M. *et al.* Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, v. 9, eadh2458, 2023. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. **Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 8ª ed. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2024. <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/>

RUFATO, L.; DE ROSSI, A.; PICCOLOTTO, L.; FACHINELLO, J.C. Plantas de cobertura de solo em pomar de pessegueiro (*Prunus persica* L. Batsch) conduzido no sistema de produção integrada. **Ciência Rural**, v. 36, n. 3, 2006. <https://www.scielo.br/>

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G.J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 36, p. 9575-9580, 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>

SANTOS, C.A.; REZENDE, C.P.; PINHEIRO, E.F.M. PEREIRA, J.M.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. **Geoderma**, v. 337, p. 394-401, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.045>

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; LIMA, H.N.; MARQUES, F.A.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema brasileiro de classificação de solos – SiBCS**. Brasília, DF: Embrapa, 2025. <https://www.embrapa.br/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>

SANTOS, H.D.; HOCHMÜLLER, D.P.; CAVALCANTI, A.C.; RÊGO, R.S.; KER, J.C.; PANOSO, L.A.; AMARAL, J.A.M. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1995. 108 p.
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330133>

SANTOS, J.C.B.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; CORRÊA, M.M.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, p. 683-696. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300001>

SCARIOT, A.; FREITAS, S.R.; MARIANO NETO, E.; NASCIMENTO, M.T.; OLIVEIRA, L.C.; SANAIOTTI, T.; SEVILHA, A.C.; VILLELA, D.M. Vegetação e flora. In: RAMBALDI, D.M.; OLIVEIRA, D.A.S. (org.) **Fragmentação de ecossistemas**: Causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas. Brasília: MMA/SBF, 2003. p. 100-123. <https://bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/9953>

SCHNECKER, J.; BALDASZI, L.; GÜNDLER, P.; PLEITNER, M.; SANDÉN, T.; SIMON, E.; SPIEGEL, F.; SPIEGEL, H.; URBINA MALO, C.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S.; RICHTER, A. Seasonal dynamics of soil microbial growth, respiration, biomass, and carbon use efficiency in temperate soils. **Geoderma**, v. 440, n. 116693, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116693> .

SCHINESTSCK, C.F.; MÜLLER, S.C.; PILLAR, V.D. Padrões espaciais da vegetação lenhosa associados ao processo de expansão da Floresta com Araucaria sobre Campos excluídos de manejo. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 14, n. 4, p. 411-429, 2019. <https://doi.org/10.3897/neotropical.14.e47885>

SHAFER, S.R.; KARLEN, D.L.; TRACY, P.W.; MORGAN, C.L.S.; HONEYCUTT, C.W. Laboratory methods for soil health assessment: an overview. In: KARLEN, D.L.; STOTT, D.E.; MIKHA, M.M. (ed.). **Laboratory Methods for Soil Health Analysis**. Soil Health Series v. 2, p. 1-16, 2021. <https://doi.org/10.1002/9780891189831.ch1>

SHIAVO, J.A.; ROSSET, J.S.; PEREIRA, M.G.; SALTON, J.C. Índice de manejo de carbono e atributos químicos de Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.46. n. 10, p. 1332-1338. 2011. <https://www.scielo.br/j/pab/a/LwggYSrq6QGXBtLnLXDD3w4/?format=pdf&lang=pt>

SILVA, C.A.; CERRI, C.E.P.; ANDRADE, C.A.; MARTIN-NETO, L.; BETTIOL, W. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. Capítulo 1. In: BETTIOL, W.; SILVA, C.A.; CERRI, C.E.P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C.A. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023 E-book. p. 17-48. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1153147>

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; ESPINAL, F.S.C.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização do nitrogênio da palha de milho e de adubos verdes pela cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 32, p. 2853-2861, 2008. <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/tcVyS3zwDWJZz3GKJPtcvBL/?format=pdf&lang=pt>

SILVA, I.V.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. Capítulo V. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.; V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SILVA, M.; SIQUEIRA, E.R.; COSTA, J.L.S. Hidrólise de diacetato de fluoresceína como bioindicador da atividade microbiológica de um solo submetido a reflorestamento. **Ciência Rural**, v. 34, n. 5, p. 1533-1539, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000500018>

SIMON, C.P.; GOMES, T.F.; PESSOA, T.N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P.B.; MARTINELLI, L.A.; CHERUBIN, M.R. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 46, e0210103, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210103>

SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155-176, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>

SKADELL, L.E.; SCHNEIDER, F.; BAUKE, S.L.; AMELUNG, W.; DON, A. Long-term management effects on depth gradients of ^{13}C , ^{15}N and C/N ratio in agricultural soils. **Geoderma**, v. 458, n. 117341, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117341>

SMITH, P. Soils and climate change. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, p. 539-544, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.005>

SMITH, P.; SOUSSANA, J.F.; ANGERS, D.; SCHIPPER, L.; CHENU, C.; RASSE, D.P.; BATJES, N.H.; VAN EGMOND, F.; MCNEILL, S.; KUHNERT, M.; ARIAS-NAVARRO, C.; OLESEN, J.E.; CHIRINDA, N.; FORNARA, D.; WOLLENBERG, E.; ÁLVARO-FUENTES, J.; SANZ-COBENA, A.; KLUMPP, K. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. **Global Change Biology**, v.26, p. 219-241, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>

SOKOL, N.W.; KITTREDGE, H.A.; BRADFORD, M.A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. **Global Change Biology**, v. 25, p. 12-24, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.14482>

SOKOL, N.W.; KUEBBING, S.E.; KARLSEN-AYALA, E.; BRADFORD, M.A. Evidence for the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon. **New Phytologist**, n. 221, p. 233-246, 2019. <https://doi.org/10.1111/nph.15361>

SOKOL, N.W.; SLESSAREV, E.; BLAZEWICZ, S.J.; HESTRIN, R.; MARSCHMANN, G.L.; BRODIE, E.L.; FIRESTONE, M.K.; FOLEY, M.M.; HUNGATE, B.A.; SULLIVAN, M.B.; KOCH, B.J.; ZABLOCKI, O.; PETT-RIDGE, J.; LLNL Soil Microbiome Consortium. Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry. **Nature Reviews Microbiology**, v. 20, n. 7, p. 415-430, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00695-z>

SOKOL, N.W.; SLESSAREV, E.; MARSCHMANN, G.L.; NICOLAS, A.; BLAZEWICZ, S.J.; BRODIE, E.L.; FIRESTONE, M.K.; FOLEY, M.; HESTRIN, R.; HUNGATE, B.A.; KOCH, B.J.; STONE, B.W.; SULLIVAN, M.B.; ZABLOCKI, O.; PETT-RIDGE, J. Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry. **Nature Reviews Microbiology**, v. 3, n. 7, p. 415-430, 2022. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>

STEIN, R.A.; SHELDON, N.D.; SMITH, S.Y. Soil carbon isotope values and paleoprecipitation reconstruction. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, v. 36, n. 12, e2020PA004158, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020PA004158>

STEWART, C.E.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R.T.; PLANTE, A.F.; SIX, J. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. **Biogeochemistry**, 86, p. 19-31. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0>

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLANT, E.; NASCIMENTO, P.C.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S.; FLORES, C.A.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed. ver. e ampl. Porto Alegre, RS: Emater/RS – Ascar. 2018. 252 p.

STROHER, A.L.; REMPEL, C.; MÜLLER, T.; HEIDRICH, D.; MACIEL, M.J. Influence of different soil uses in the Pampa biome, southern Brazil, on fungal communities. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 58, p. 182-191, 2023. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781550>

SVEDIN, J.D.; VEUM, K.S.; RANSOM, C.J.; KITCHEN, N.R.; ANDERSON, S.H. An identified agronomic interpretation for potassium permanganate oxidizable carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 87, p. 291-308, 2023. <https://doi.org/10.1002/saj2.20499>

TABATABAI, M.A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W.; SCOTT, A.; BOTTOMLEY, P.J. (Ed.), **Methods of Soil Analysis**. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. Madison: Soil Science Society of America, Book n.5, p. 778-833, 1994.

TAO, Y.; QIN, H.; YAN, C.; LIU, Q.; HE, W. Low soil carbon saturation deficit limits the abundance of *cbbL*-carrying bacteria under long-term no-tillage maize cultivation in northern China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 21, n. 8, p. 2399-2412, 2022. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63800-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63800-5)

TE-WIERIK, S.; DECLERCK, F.; BEUSEN, A.; GERTEN, D.; MAGGI, F.; NORBERG, A.; NOONE, K.; SCHULTE-UEBBING, L.; SPRINGMANN, M.; TANG, F.H.M.; DE VRIES, W.; VAN VUUREN, D.; VERMEULEN, S.; ROCKSTRÖM, J. Identifying the safe operating space for food systems. **Nature Food**, v. 6, p. 1153-1163, 2025. <https://doi.org/10.1038/s43016-025-01252-6>

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p. <https://www.embrapa.br/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>

TIAN, P.; RAZAVI, B.S.; ZHANG, X.; WANG, Q.; BLAGODATSKAYA, E. Microbial growth and enzyme kinetics in rhizosphere hotspots are modulated by soil organics and nutrient availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 142, p. 107662, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107662>

TIEMANN; L.K.; GRANDY, A.S.; ATKINSON, E.E.; MARIN-SPIOTTA, E.; MCDANIEL, M.D. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. **Ecology Letters**, v. 18, n. 8, p. 761-771.
<https://doi.org/10.1111/ele.12453>

TINTI, A.; TUGNOLI, V.; BONORA, S.; FRANCIOSO, O. Recent applications of vibrational mid-Infrared (IR) spectroscopy for studying soil components: a review. **Journal of Central European Agriculture**, v. 16, n. 1, 2015.
<https://doi.org/10.5513/JCEA01/16.1.1535>

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M.C.; GIL-SOTRES, F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, p. 2146-2155, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.015>

TROIAN, D.; ROSSET, J.S.; MARTINS, L.F.B.N.; OZÓRIO, J.M.B.; CASTILHO, S.C.P.; MARRA, L.M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**. v. 13, n. 4, p. 1-23, 2020.
<https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n4p1447-1469>

UNITED NATIONS. **The "4 per 1000" Initiative and its implementation**. Department of Economic and Social Affairs – Sustainable Development. Acesso em: julho de 2026.
<https://sdgs.un.org/partnerships/>

VAN GILS, A. The Uninhabitable Earth: Life After Warming. **Ethics, Policy & Environment**, v. 23, n.1, p. 118-121, 2020.
<https://doi.org/10.1080/21550085.2020.1733300>

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. 2ª ed. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2017. 420 p.

VELOSO, M.G.; ANGERS, D.A; TIECHER, T.; GIACOMINI, S.; DIECKOW, J.; BAYER, C. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops, **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 268, p. 15-23, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.024>

VENZKE, T.S.L. **Estudos sobre ecologia florestal de um gradiente ambiental no município de Pelotas, RS, Brasil**. 2017. 70 p. Tese (Doutorado em Ciências). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

VENZKE, T.S.L.; MIGUEL, P.; LEIDEMER, J.D.; PAGANI JUNIOR, A.; PINTO, L.F.S. A regeneração natural de floresta nativa é influenciada pela pecuária bovina leiteira? **Ciência Florestal**, v. 33, n. 3, e69370, p. 1-17, 2023.
<https://doi.org/10.5902/1980509869370>

VERES, Z.; KOTROCZÓ, Z.; FEKETE, I.; TÓTH, J.A.; LAJTHA, K.; TOWNSEND, K.; TÓTHMÉRÉSZ, B. Soil extracellular enzyme activities are sensitive indicators of detrital inputs and carbon availability. **Applied Soil Ecology**, v. 92, p. 18-23, 2015.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.03.006>

VICINI, L.; SOUZA, A.M.; MORALES, F.E.C.; SOUZA, F.M. **Técnicas multivariadas exploratórias: teorias e aplicações no software Statistica®**. Santa Maria. RS: Editora da UFSM. 2018. 240 p.

VIEIRA, F.C.B.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; HE, Z.L.; Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems, **Soil and Tillage Research**, v. 96, n. 1-2, p. 195-204, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.06.007>

VIEIRA, R.C.B.; VIEIRO, F. Ciclo biogeoquímico do cálcio e do magnésio. Capítulo 10. *In*: TIECHER, T.; LOURENZI, C.R.; MARTINS, A.P.; BRUNETTO, G.; CARLOS, F.S.; SILVA, L.S.; ESCOTEGUY, P.A.V. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas**. Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2025, p. 233-249.

VILLELA, J.M.; DAMIAN, J.M.; GONÇALVES, D.R.P.; BARIONI, L.G.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C.E.P. Soil carbon debt from land use change in Brazil. **Nature Communications**, v. 17, art. 1626, p. 1-12, 2026. <https://doi.org/10.1038/s41467-026-68340-4>

VISSER, A.; LAUERER, M.; ABDALLA, K.; PAUSCH, J.; BARTH JOHANNES, A.C. Short-term influences of C4 versus C3 plant growth on dissolved inorganic carbon in a carbonate-poor soil. **Plant and Soil**, v. 519, p. 1663-1677, 2026. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-08239-z>

WEIL, R.; ISLAM, R.; STINE, M.A.; GRUVER, J.; SAMSON-LIEBIG, S.E. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, n.18, p. 3-17, 2003. <https://doi.org/10.1079/AJAA2003003>

WIESMEIER, M.; URBANSKI, L.; HOBLEY, E.; LANG, B.; VON LÜTZOW, M.; MARIN-SPIOTTA, E.; VAN WESEMAEL, B.; RABOT, E.; LIEß, M.; GARCIA-FRANCO, N.; WOLLSCHLÄGER, U.; VOGEL, H.J.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, 333, 149-162, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

WHITEHEAD, D.; SCHIPPER, L.A.; PRONGER, J.; MOINET, G.Y.K.; MUDGE, P.L.; PEREIRA, R.C.; KIRSCHBAUM, M.U.F.; MCNALLY, S.R.; BEARE, M.H.; CAMPS-ARBESTAIN, M. Management practices to reduce losses or increase soil carbon stocks in temperate grazed grasslands: New Zealand as a case study. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 265, p. 432-443, 2018. <https://doi.org/10.1073/pnas.2310223120>

WREGGE, M.S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; ALMEIDA., I.R. **Atlas climático da Região Sul do Brasil**: estados do Paraná. Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Brasília. DF: Embrapa. 2012. 334 p. <https://www.agricultura.rs.gov.br/atlas-climatico-da-regiao-sul-do-brasil.pdf>

WYNN, J.G. Carbon isotope fractionation during decomposition of organic matter in soils and paleosols: implications for paleoecological interpretations. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 251, p. 437-448, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.04.009>

WYNN, J.G.; BIRD, M.I. C₄-derived soil organic carbon decomposes faster than its C₃ counterpart in mixed C₃/C₄ soils. **Global Change Biology**, v. 13, p. 2206-2217, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01435.x>

XIA, Y.; WANDER, M. Responses of β -glucosidase, permanganate oxidizable carbon, and fluorescein diacetate hydrolysis to conservation practices. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, p.1-14, 2021. <https://doi.org/10.1002/saj2.20261>

XIAN, S.; ZHANG, L. Robustness measurement of comprehensive evaluation model based on the Intraclass Correlation Coefficient. **Mathematics**, v.13, n.11:1748, p. 2-19, 2025. <https://doi.org/10.3390/math13111748>

YIN, T.; QIN, H.; YAN, C.; LIU, Q.; HE, W. Low soil carbon saturation deficit limits the abundance of cbbL carrying bacteria under long-term no-tillage maize cultivation in northern China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 21, n. 8, p. 2399-2412, 2022. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63800-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63800-5)

YU, W.; HUANG, W.; WEINTRAUB-LEFF, S.R.; HALL, S.J. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 172, n. 108756, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108756>

ZALASIEWICZ, J.; WILLIAMS, M.; SMITH, A.; BARRY, T.L.; COE, A.L.; BOWN, P.R.; BRENCHLEY, P.; CANTRILL, D.; GALE, A.; GIBBARD, P.; GREGORY, F.J.; HOUNSLOW, M.W.; KERR, A.C.; PEARSON, P.; KNOX, R.; POWELL, J.; WATERS, C.; MARSHALL, J.; OATES, M.; RAWSON, P.; STONE, P. Are we now living in the Anthropocene? **GSA Today**, v. 18, n. 2, 2008. <https://doi.org/10.1130/GSAT01802A.1>

Apêndices

Apêndice A – Histórico de uso e manejo das áreas

As áreas foram classificadas segundo o sistema de uso típico adotado em cada propriedade avaliada, nas seguintes categorias: Campo Nativo, Lavoura, Lavoura/Pomar, Pomar e Mata Nativa. Os Perfis P1 a P7 foram descritos e classificados entre maio de 2020 e maio de 2021 no âmbito da dissertação de Barbosa (2022). Os perfis P8 a P11 foram descritos entre janeiro e abril de 2022, por ocasião da dissertação de Pagani Junior (2022). Na tese de Venzke (2017) foram descritos os perfis P12 e P13. Os perfis P14 a P17 foram descritos e classificados no âmbito da disciplina de Morfologia, Gênese e Classificação de Solos, do PPG MACSA (2023/2).

O conjunto dos perfis analisados (P1 a P17) estão apresentados no Quadro 2, com a classificação, a localização geográfica, data de descrição dos perfis e uso do solo na coleta realizada em novembro de 2025. Além disso, foi acrescentada uma breve descrição do histórico de usos de cada área. As informações foram fornecidas diretamente pelos produtores em entrevistas realizadas nas propriedades rurais, em 05 de setembro de 2026. Exceção feita a proprietário e ao arrendatário da área do perfil P14, que forneceram as informações via whatsapp.

Os perfis P1 a P13 estão localizados em três propriedades contíguas que juntas perfazem uma área aproximada de 53 ha. Os perfis P1, P7, P8, P9 e P10 compõem uma mesma propriedade, enquanto os perfis P2 a P6 e o perfil P11, constituem duas outras propriedades. A maior parte dessa área está ocupada por mata nativa (42,0%), seguida pela fruticultura (pessegueiro) que abrange 31,6% da área, e por pastagens em campo nativo (20,4%), destinadas à produção leiteira e criação de gado de corte. Os 6% restantes são cultivados com culturas anuais (Barbosa, 2022; Pagani Junior, 2022). Dentre as culturas desenvolvidas nestas propriedades destaca-se o milho, intercalado eventualmente com cultivos de batatas, abóbora etc., quando da renovação dos pomares. Nos quatro outros perfis (P14 a P17), os usos compreendem pastagens sucedidas por cultivo de soja no verão (P14), pomares de pessegueiro (P15 e P17) e área de campo sujo, sem usos recentes (P16).

Os perfis P1, P11 e P16, quando descritos, apresentavam cobertura campestre. Nas coletas de amostras realizadas em 2025, uma outra área de campo, localizada

junto à área de mata nativa do perfil P9, foi incluída. O perfil P1 foi classificado por Barbosa (2022) como *campo sujo*, fitofisionomia arbustiva-herbácea que caracteriza essas quatro áreas de campo nativo. Essa fisionomia é encontrada em solos rasos, como os Neossolos Litólicos, apresentando arbustos e subarbustos esparsos, cujos indivíduos, muitas vezes, consistem em formas menos desenvolvidos de espécies arbóreas (Overbeck *et al.*, 2009; Ribeiro; Walter, 2008). Historicamente, o P1 havia sido cultivado com pessegueiros até agosto de 2019, permanecendo em pousio campestre até agosto de 2021, quando passou a ser cultivado com milho, contabilizando três safras colhidas na área. Conforme relatou o proprietário, para implantação do cultivo de milho foi passado o subsolador na área, a uma profundidade de cerca de 15 centímetros. Após a colheita do milho (maio-junho), a área é mantida em pousio até agosto, mês em que é realizada nova roçada e aplicação de herbicida (glufosinato de amônio). O plantio é mecanizado e ocorre em setembro, conforme o calendário lunar (primeira lua crescente do mês).

Das áreas de campo avaliadas, apenas a representada pelo perfil P11 é utilizada para o pastoreio de gado bovino. A área possui cerca de 1,3 ha e é utilizada como pastagem para recria de gado de corte, com lotação de 4 a 5 animais. A área vem sendo utilizada para esta finalidade há mais de 15 anos. Segundo informou o proprietário, antes desse período houve a tentativa de implantação de um pomar de pessegueiro, contudo, não se obteve sucesso, devido ao elevado teor de umidade do solo local.

O perfil P16 corresponde a uma área de campo sujo, localizada à beira da estrada e próximo a uma das casas da propriedade. A área está sem cultivos há mais de oito anos; anteriormente, foi cultivada com milho por três safras sucessivas. Inicialmente, o proprietário tentou implantar um pomar de pessegueiro no local, contudo, relatou que o solo era muito 'saibroso', razão pela qual as plantas não teriam se desenvolvido adequadamente.

O perfil P14 serviu de área de pastagem para gado bovino até 2019, quando a área foi arrendada para o cultivo de soja no verão. Desde então, os cultivos de soja são sucedidos por pousios de inverno, quando o gado retorna à área. Nas primeiras três safras (2019-2021), a área foi gradeada para a implantação da cultura, devido à

compactação do solo pela elevada taxa de lotação animal por hectare. Nas safras posteriores, o cultivo se deu sob sistema de plantio direto sobre a palhada remanescente. Como práticas culturais, realizaram-se a correção da acidez com calcário (250 kg ha^{-1}) e a adubação química com NPK (2-18-18 e 5-20-20). Além disso, foram aplicados herbicidas pré-emergentes, fungicidas e inseticidas durante o ciclo da cultura.

No perfil P2 (Propriedade 2), o uso com pomares predominou até agosto de 2019, quando foi removido. Em 2020, foi implantado na área lavoura de milho, cultivadas até 2023 com desenvolvimento de gramíneas espontâneas, durante o pousio no inverno, predominantemente azevém. Em 2023 um novo pomar foi implantado na área, com cultivo de milho nas entrelinhas no primeiro ano.

Nos perfis P3, P4, P5 e P6 (Propriedade 2), predomina o cultivo de pessegueiros há 14 anos. Na implantação de pomares novos, nos primeiros dois anos, realiza-se o cultivo de milho, abóbora ou feijão nas entrelinhas, de forma a manter sempre a cobertura do solo. Nesse período, novilhos de gado bovino com até um ano são alocados nos pomares para consumo das plantas de cobertura nas entrelinhas. Nas áreas destes perfis, novos pomares foram implantados em julho de 2020, com o cultivo de lavouras de milho nas entrelinhas. A correção da acidez do solo é realizada, geralmente, na implantação do pomar, mediante a aplicação de 1 t ha^{-1} de calcário, enquanto a fertilização das áreas é feita com as formulações NPK 13-13-13 e 18-6-12. Em pomares maduros, utilizam-se nas entrelinhas plantas de cobertura como aveia-preta, azevém e centeio. O proprietário da área destacou, também, a ocorrência espontânea de ervilhaca e nabo-forrageiro nas entrelinhas. Entre os meses de maio e julho são realizadas as podas, após o que se realiza a roçada nas entrelinhas para triturar os galhos removidos, prática repetida, também, antes e após a colheita. Na linha de cultivo, sob a copa dos pessegueiros, aplica-se o herbicida glifosato quando o azevém atinge maior desenvolvimento vegetativo. Após as podas, realiza-se uma roçada para triturar os galhos removidos, prática que é repetida nas entrelinhas antes e após a colheita. Na linha de cultivo, sob a copa dos pessegueiros, aplica-se o herbicida glifosato quando o azevém atinge maior desenvolvimento vegetativo.

As áreas dos perfis P7 e P10 (Propriedade 1) eram ocupadas até 2022 por pomares maduros de pessegueiro. Em 2025 o pomar do perfil P7 foi removido e implantado o cultivo de olerícolas (batata e abóbora). No mesmo ano, o pomar do perfil P10 foi parcialmente erradicado para dar lugar ao cultivo de milho por três safras sucessivas. Nas entrelinhas dos pomares remanescentes, mantêm-se as gramíneas espontâneas, manejadas com roçadas antes e após a colheita. A poda dos pessegueiros é realizada no período de maio a julho, sendo precedida pela roçada da entrelinha. A correção da acidez do solo é realizada mediante a aplicação de calcário ($2,5 \text{ t ha}^{-1}$) e a fertilização com a formulação NPK 13-13-13.

O pomar vinculado ao perfil P15 foi implantado em 2015 em uma antiga área de mata de eucaliptos. O proprietário da área informou que a mata remontava a mais de 100 anos, restando ainda os cepos das antigas árvores na área. Nas entrelinhas, mantêm-se gramíneas espontâneas, manejadas com três roçadas anuais, com a manutenção dos resíduos *in loco*. O proprietário relatou que, neste pomar, é desenvolvido um tratamento biológico, à base de microrganismos, para controle de pragas e doenças, tanto nas plantas quanto no solo, denominado TMT (Tecnologia Microbiológica Tomita). O TMT é uma prática de manejo biológico do solo utilizada na agricultura regenerativa e orgânica com o intuito de restaurar a microbiota, melhorar a estrutura física e potencializar a fertilidade do solo. O TMT consiste na multiplicação aeróbia de comunidades de microrganismos benéficos diretamente na propriedade rural. O produtor relata que coleta a microbiota em áreas de mata nativa preservada (devido à rica diversidade de fungos e bactérias benéficos) e a multiplica em tanques com melaço de cana. Quanto às práticas de manejo químico do solo, o proprietário relatou que não tem sido realizada a correção da acidez do solo e que a fertilização é realizada utilizando NPK 13-13-13.

O pomar representado pelo perfil P17 perdurou por 20 anos, conforme relatou o proprietário da área. Durante este período, realizou-se o manejo de gramíneas espontâneas nas entrelinhas e foram mantidos os restos de podas, dos raleios e restos culturais. O pomar foi abandonado há quatro anos, após a última colheita, ocorrida em 2022. Segundo o produtor, o pomar já não apresentava produtividade adequada e será substituído.

As áreas de mata nativa correspondentes aos perfis P12 e P13, fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, foram caracterizadas ecologicamente por Venzke (2017). Além desses, os perfis P8 e P9 também compõem as áreas de mata nativa. O perfil P12 localiza-se na parte central do fragmento, enquanto os perfis P8 e P13 estão situados à margem da mata, sujeitos aos efeitos de borda e ao pastejo bovino. A mata onde foi descrito o perfil P9, não está sujeita ao pastoreio e, segundo o proprietário da área, remonta aos tempos de seu avô, com idade superior a 100 anos. Os fragmentos florestais sem o acesso da pecuária constituem florestas com maior densidade e maior riqueza florística, ocorrendo mais de 40 espécies, enquanto nas áreas pastoreadas ocorrem menos de 30 espécies. Como reflexo da pressão do pastoreio, os parâmetros fitossociológicos são reduzidos. Nas florestas protegidas, a densidade de árvores por hectare foi maior (entre 30.250 e 33.250), compatível com o padrão de florestas naturais no Brasil. Em contrapartida, nas áreas pastoreadas, a densidade estimada das plântulas e dos indivíduos jovens de árvores e arbustos declina para menos 10.000 indivíduos. Esse empobrecimento estrutural refletiu-se nos baixos valores de diversidade das áreas com gado que apresentaram Índice de Shannon (H') de 2,12 e Índice de Equabilidade de Pielou (J') de 0,68, diferindo das áreas inacessíveis ao gado, cujos índices foram de 3,22 e 0,84, respectivamente (Venzke, 2017; Venzke *et al.*, 2023).

Quadro 1 – Datas das coletas de amostras, localização e histórico de usos da terra, em Neossolos Litólicos e Regolíticos, em diversas propriedades localizadas no interior de Pelotas, na região do Escudo Sul-Rio-Grandense

Perfil	Classe	Coordenadas	Descrição do perfil		Uso 2025	Propriedades	Histórico de uso
			Data	Uso			
P1	RL	31°33'55,09"S 52°28'50,08"O	03/12/2020	Campo sujo	Lavoura	Propriedade 1	Pomar de pêssgo até agosto de 2019, quando foi removido. Ficou em pousio até agosto de 2021 quando passou a ser cultivado com milho
P2	RL	31°33'56,62"S 52°28'44,92"O	09/12/2020	Lavoura	Pomar	Propriedade 2	Pomar implantado em junho de 2013 e removido em agosto de 2019. Cultivo de milho implantado em 2020 e mantido até 2023, quando foi implantado o pomar.
P3	RR	31°34'1,32"S 52°28'43,91"O	23/04/2021	Lavoura/pomar	Pomar	Propriedade 2	Area cultivada com pomares há 14 anos. Novo pomar implantado em julho de 2020.
P4	RR	31°34'1,83"S 52°28'41,98"O	30/04/2021	Lavoura/pomar	Pomar	Propriedade	Area cultivada com pomares há 14 anos. Novo pomar implantado em julho de 2020
P5	RR	31°34'3,20"S 52°28'40,25"O	07/05/2021	Lavoura/pomar	Pomar	Propriedade 2	Area cultivada com pomares desde 2010. Novo pomar implantado em julho de 2020.
P6	RL	31°33'56,74"S 52°28'48,23"O	24/05/2021	Lavoura/pomar	Lavoura	Propriedade 2	Area cultivada com pomares desde 2014. Em 2025 foi implantado novo pomar com cultivo de milho nas entrelinhas.
P7	RL	31°33'56,88"S 52°28'49,75"O	31/05/2021	Pomar	Pomar e Lavoura	Propriedade 1	Area cultivada com pomares desde 2015. Em 2025 o pomar foi, parcialmente, removido e implantado cultivo de batatas e outras
P8	RR	31°34'4,63"S 52°28'53,40"O	19/01/2022	Mata nativa	Mata nativa	Propriedade 1	Fragmento de floresta estacional semidecidual, em estágio médio avançado de regeneração. Borda do fragmento com acesso eventual de gado

Continua

Perfil	Classe	Coordenadas	Descrição do perfil		Uso 2025	Propriedades	Histórico de uso
			Data	Uso			
P9	RR	31°33'50,37"S 52°29'0,64"O	15/02/2022	Mata nativa	Mata nativa	Propriedade 1	Fragmento de floresta estacional semidecidual
		31°33'50,59"S 52°29'0,23"O	---	---	Campo sujo	Propriedade 1	Área sem cultivo há mais de 25 anos
P10	RL	31°33'49,56"S 52°28'54,34"O	18/04/2022	Pomar	Pomar e Lavoura	Propriedade 1	Area cultivada com pomares há 30 anos. Em 2025 o pomar foi parcialmente removido e implantado cultivo de milho
P11	RL	31°33'45,59"S 52°29'3,31"O	15/02/2022	Campo nativo	Campo nativo	Propriedade 3	Campo nativo destinado ao pastoreio desde 2005
P12	RR	31°34'2,00"S 52°28'45,70"O	28/12/2017	Mata nativa	Mata nativa	Propriedade 2	Fragmento floresta estacional semidecidual, em estágio médio avançado de regeneração. Núcleo do fragmento.
P13	RR	31°34'7,14"S 52°28'50,33"O	28/12/2017	Mata nativa	Mata nativa	Propriedade 2	Fragmento floresta estacional semidecidual, em estágio médio avançado de regeneração. Borda do fragmento com acesso eventual de gado.
P14	RR	31°34'28,92"S 52°29'5,64"O	07/12/2023	Lavoura	Campo sujo	Propriedade 4	Campo sujo até 2018. Nos anos de 2021, 2022 e 2023 foi cultivado com soja, quando a área foi colocada em pousio. Em 2025 apresentava uma fitofisionomia de campo sujo.
P15	RL	31°32'37,84"S 52°30'12,02"O	08/02/2024	Pomar	Pomar	Propriedade 5	Antiga mata de eucaliptos (>100 anos). Em janeiro de 2014 foi desmatada. Em julho de 2015 foi implantado pomar de pêssegos.
P16	RR	31°32'46,00"S 52°31'19,00"O	08/02/2024	Campo sujo	Campo sujo	Propriedade 6	Área de campo sujo, sem cultivos há oito anos. Antes disso foi cultivada com milho por três safras.
P17	RR	31°32'37,00"S 52°32'56,00"O	08/02/2024	Pomar	Pomar	Propriedade 7	Pomar de pêssegos com 20 anos. Última colheita em 2022, abandonado desde então pela baixa produtividade. Será substituído em breve.

Fonte: elaborado pelo autor

Apêndice B – Análise estatística do Capítulo 1

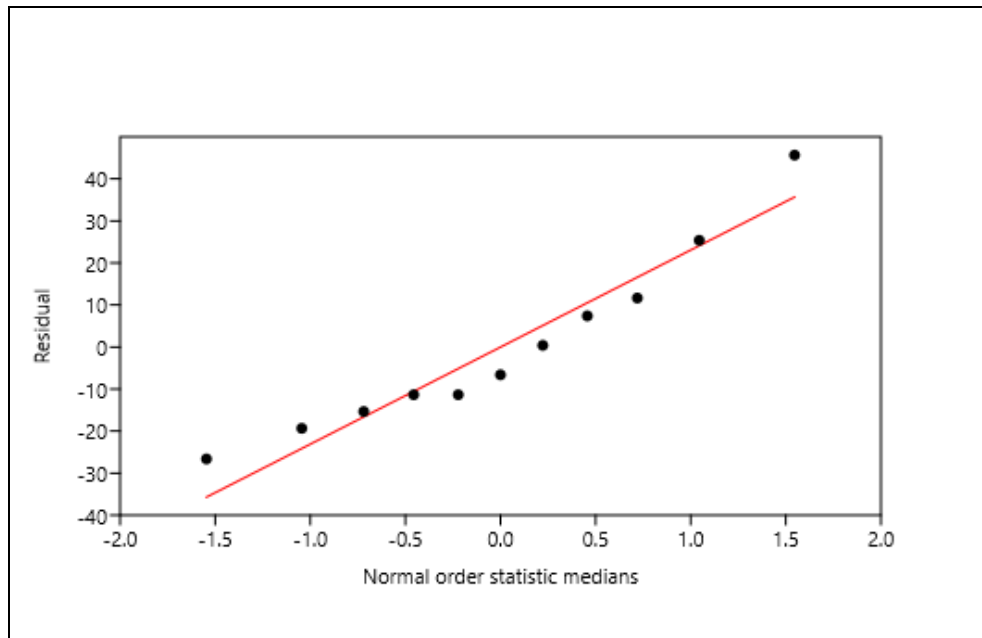
Relatório das análises estatísticas, realizadas no software PAST 4,03®, para as variáveis aleatórias avaliadas no Capítulo 1 que apresentaram diferenças significativas.

Elevação (altitude, em metros)

	RL	RR
	177	101
	112	94
	116	87
	120	67
	120	119
	143	
Média	131	94
Desvio padrão	25	19

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9282, p (Normal) = 0,393

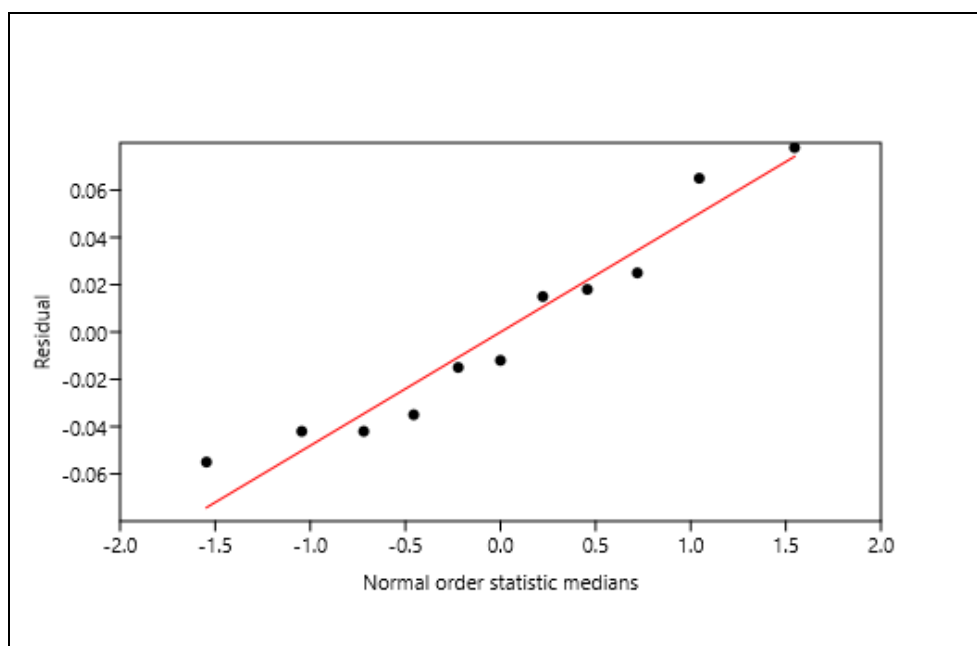


Macroporosidade

	RR	RL
	0.15	0.35
	0.15	0.43
	0.18	0.35
	0.21	0.37
	0.27	0.11
	-	0.35
Média	0,19	0,32
Desvio padrão	0,05	0,14

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9255, p (Normal) = 0,3667



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	0,0122427	1	0,0122427	5,613	0,04196
Within groups:	0,01963	9	0,0021811		
Total:	0,0318727	10	0,04574		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,00184463	Var(error):	0,00218111	ICC:	0,4582
Omega2:	0,2955				

Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	0,8154
Levene's test, from medians	p (same):	0,9524

Welch F test in the case of unequal variances: F=5,459, df=8,072, p=0,04741

Tukey's Pairwise	RL	RR
Ma - RL		0,04196
Ma - RR	3,351	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	4,033
Hc (tie corrected):	4,108
p (same):	0,04268

Mann-Whitney Pairwise	RL	RR
Ma - RL		0,05303
Ma - RR	0,05303	

Dunn's post hoc	RL	RR
Ma - RL		0,04268
Ma - RR	0,04268	

Apêndice C – Análise estatística do Capítulo 2

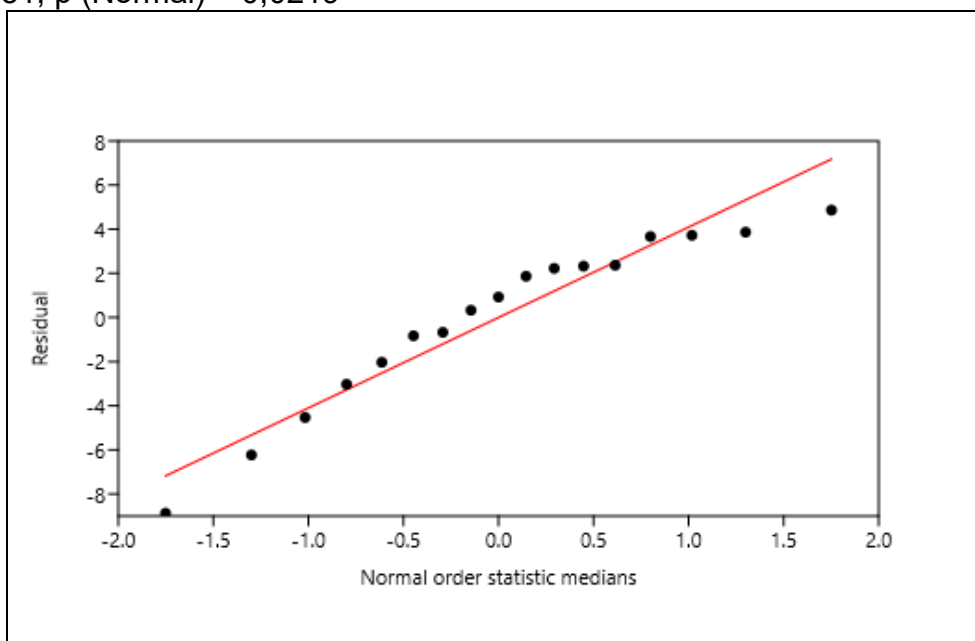
Relatório das análises estatísticas, realizadas no *software* PAST 4,03®, para as variáveis aleatórias que apresentaram diferenças significativas entre as duas classes de Neossolos.

FTIR – MOP: Faixa espectral 2970 – 2840 cm⁻¹

	2970 – 2840	
	RL	RR
	16,0	15,8
	16,6	12,8
	6,8	6,4
	18,0	8,9
	17,9	14,6
	19,4	14,8
	15,0	13,3
	-	10,1
	-	7,9
	-	4,7
Média	15,67	10,92
Desvio Padrão	4,16	3,85

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,8851; p (Normal) = 0,0219



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	925,694	1	925,694	5,809	0,02923
Within groups:	239,015	15	159,344		
Total:	331,585	16	0,0307		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	930,569	Var(error):	159,344	ICC:	0,368687
omega2:	0,2205				

Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	0,5946
Levene's test, from medians	p (same):	0,5093

Welch F test in the case of unequal variances: F=5,646, df=12,4, p=0,03439

Tukey's Pairwise	RL	RR
RL		0,02923
RR	3,409	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	6,438
Hc (tie corrected):	6,438
p (same):	0,01117

Mann-Whitney Pairwise	RL	RR
RL - 2970		0,01283
RR - 2970	0,01283	

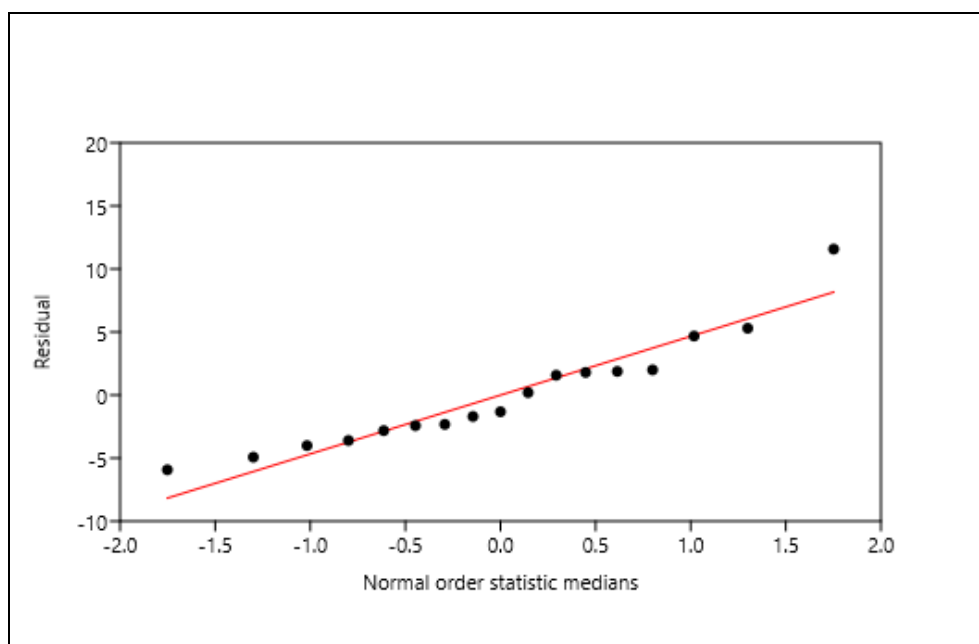
Dunn's post hoc	RL	RR
RL - 2970		0,01117
RR - 2970	0,01117	

FTIR – MOP: Faixa espectral 1000 – 700 cm⁻¹

	925 – 710	
	RL	RR
	17,4	18,7
	12,3	16,2
	8,1	32,7
	14,1	23,0
	13,9	18,3
	10,4	22,7
	8,5	15,2
	-	18,8
	-	25,8
	-	19,8
Média	12,1	21,1
Desvio Padrão	3,4	5,2

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9221; p (Normal) = 0,1601



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	335,013	1	335,013	16,24	0,001091
Within groups:	309,436	15	206,291		
Total:	644,449	16	0,00075		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	381,752	Var(error):	206,291	ICC:	0,649191
omega2:	0,4727				

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,3381

Levene's test, from medians p (same): 0,5223

Welch F test in the case of unequal variances: F=18,96, df=14,95, p=0,0005707

Tukey's Pairwise	RL	RR
RL		0,001091
RR	5,699	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	10,37
Hc (tie corrected):	10,37
p (same):	0,00128

Mann-Whitney Pairwise	RL	RR
RL		0,001516
RR	0,001516	

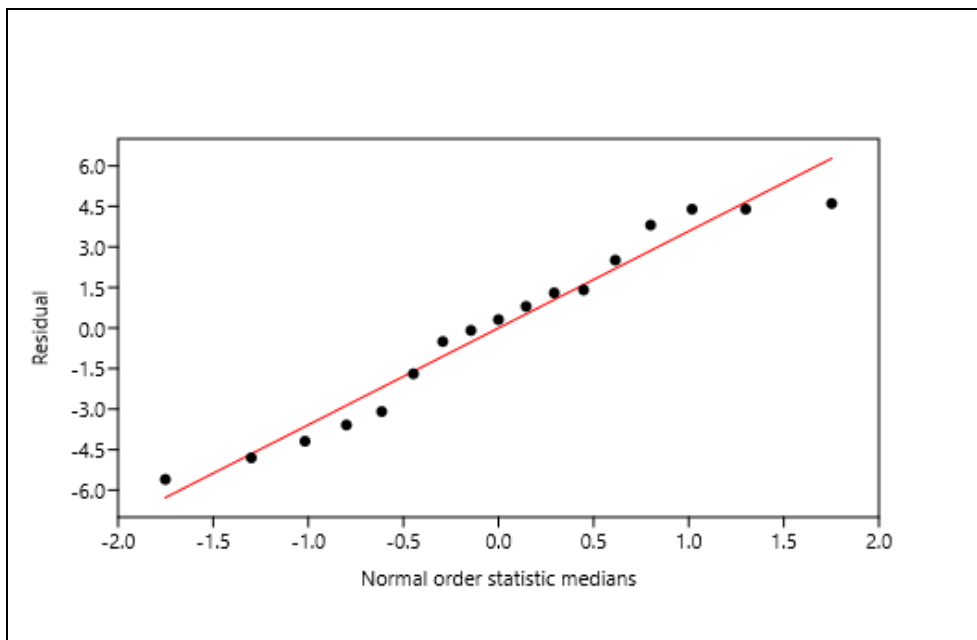
Dunn's post hoc	RL	RR
RL		0,00128
RR	0,00128	

FTIR – MOAM: Faixa espectral 2970 – 2840 cm⁻¹

	2970 – 2840	
	RL	RR
	17,7	8,8
	16,4	8,4
	18,2	6,8
	11,3	4,9
	12,1	5,4
	21,3	11,0
	21,3	9,9
	-	4,3
	-	12,3
	-	13,1
Média	16,90	8,49
Desvio Padrão	3,99	3,11

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9384; p (Normal) = 0,3002



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	291,233	1	291,233	23,91	0,0001962
Within groups:	182,709	15	121,806		
Total:	473,942	16	0,0004		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	33,885	Var(error):	121,806	ICC:	0,735581
omega2:	0,574				

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,5292

Levene's test, from medians p (same): 0,6412

Welch F test in the case of unequal variances: F=21,79, df=10,87, p=0,0007069

Tukey's Pairwise	RL	RR
RL		0,0001962
RR	6,915	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	9,152
Hc (tie corrected):	9,164
p (same):	0,002469

Mann-Whitney Pairwise	RL	RR
RL		0,002898
RR	0,002898	

Dunn's post hoc	RL	RR
2970 – 2840 - RL		0,002469
2970 – 2840 - RR	0,002469	

Apêndice D – Análise estatística do Capítulo 3

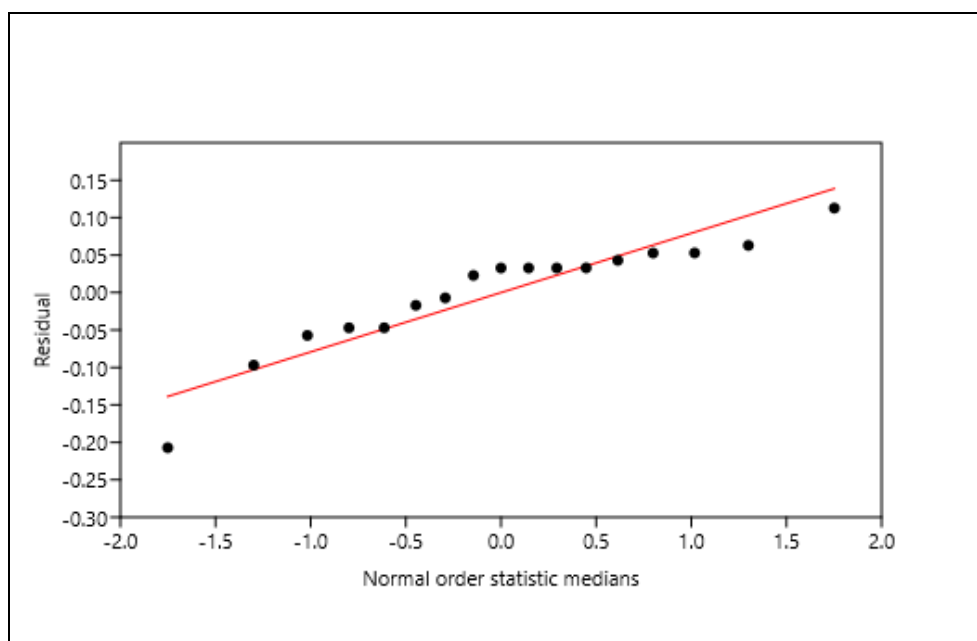
Relatório das análises estatísticas, realizadas no *software* PAST 4,03®, para as variáveis aleatórias avaliadas no Capítulo 3 que apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as duas classes de Neossolos e entre os usos alternativos do solo.

Microporosidade

	RL	RR
	0,35	0,27
	0,43	0,28
	0,35	0,25
	0,37	0,29
	0,11	0,18
	0,35	0,26
	0,26	0,22
	-	0,21
	-	0,13
	-	0,18
Média	0,32	0,23
Desvio padrão	0,10	0,05

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,8880, p (Normal) = 0,0429



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	0,0335	1	0,03346	5,617	0,03162
Within groups:	0,0894	15	0,00596		
Total:	0,1228	16	0,03401		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,00333953	Var(error):	0,00595686	ICC:	0,3592
Omega2:	0,2136				

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,1670

Levene's test, from medians p (same): 0,5374

Welch F test in the case of unequal variances: F=4,471, df=8,123, p=0,06689

Tukey's Pairwise	RL	RR
RL		0,0316
RR	3,352	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	4,402
Hc (tie corrected):	4,435
p (same):	0,035

Mann-Whitney Pairwise	RL	RR
RL		0,0397
RR	0,0397	

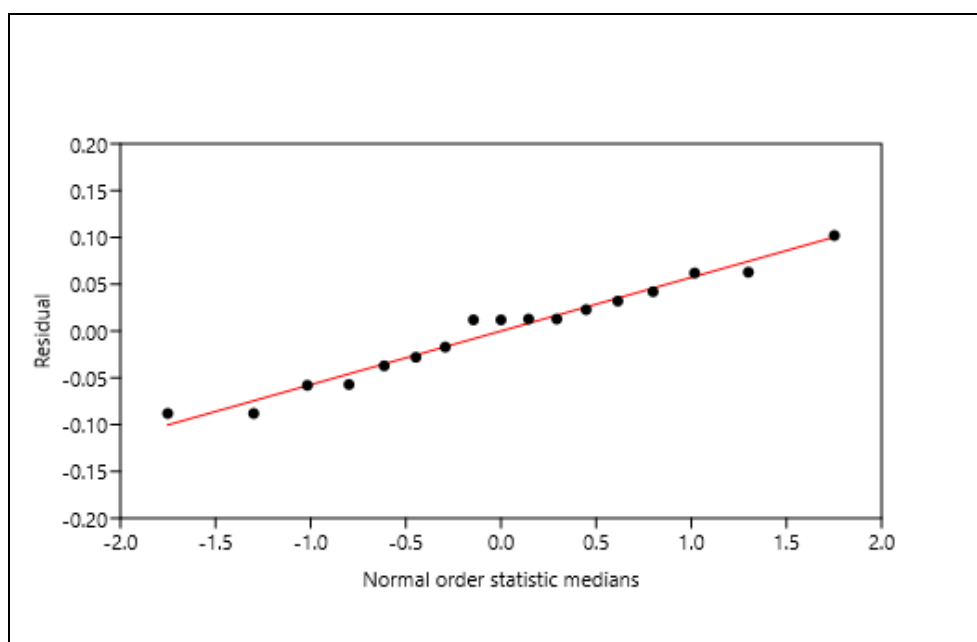
Dunn's post hoc	RL	RR
RL		0,0352
RR	0,0352	

Macroporosidade

	RL	RR
	0,11	0,15
	0,07	0,15
	0,09	0,18
	0,15	0,21
	0,19	0,27
	0,14	0,28
	0,14	0,25
	-	0,25
	-	0,34
	-	0,30
Média	0,13	0,24
Desvio Padrão	0,04	0,06

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9653, p (Normal) = 0,7322



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	0,05060	1	0,05060	16,25	0,0011
Within groups:	0,04670	15	0,00311		
Total:	0,09731	16	0,00178		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,00576658	Var(error):	0,00311352	ICC:	0.6494
Omega2:	0,4729				

Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	0,1633
Levene's test, from medians	p (same):	0,2596

Welch F test in the case of unequal variances: F=19,12, df=14,91, p=0,0006

Tukey's Pairwise	RL	RR
RL		0.0011
RR	5.7010	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	9,006
Hc (tie corrected):	9,102
p (same):	0,0025

Mann-Whitney Pairwise	RL	RR
RL		0,0028
RR	0,0028	

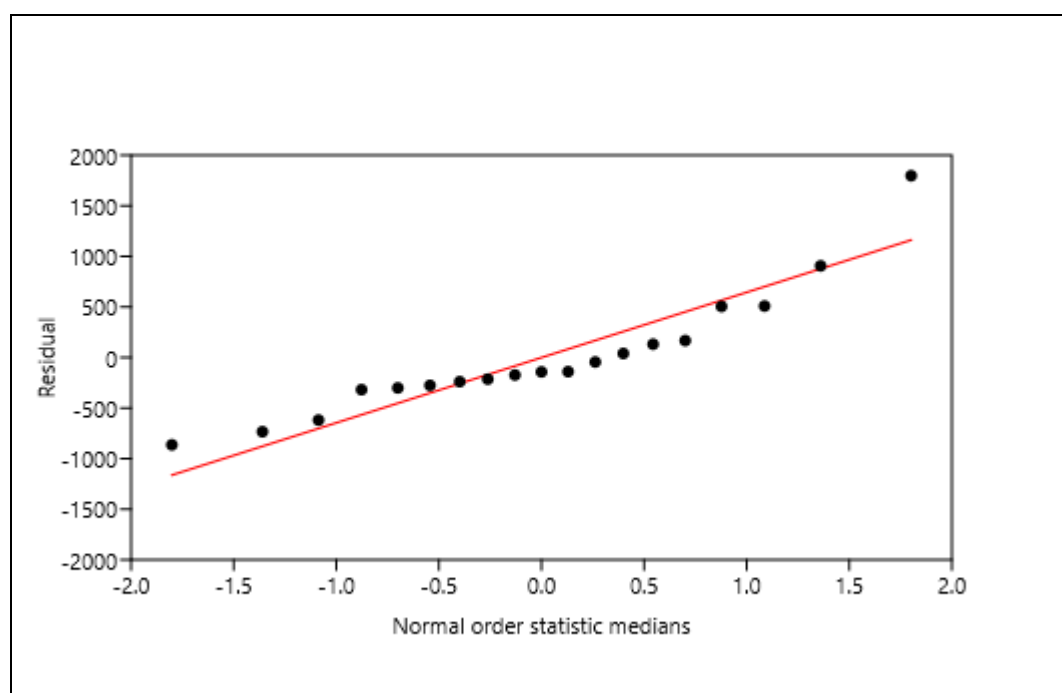
Dunn's post hoc	RL	RR
RL		0,00239
RR	0,00239	

Arilsulfatase

	RL	RR
	743,32	960,94
	433,80	643,05
	531,45	528,39
	402,61	1.766,68
	300,62	3.059,44
	361,57	2.167,74
	1.084,99	943,45
	615,56	398,23
	707,11	1.022,41
		1.121,52
Média	575,67	1.261,19
Desvio Padrão	244,92	832,83

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,8808, p (Normal) = 0,0222



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	2,23x10 ⁶	1	2,23 x10 ⁶	5,629	0,02973
Within groups:	6,72x10 ⁶	17	395434		
Total:	8,95 x10 ⁶	18	0,01753		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	193225	Var(error):	395434	ICC:	0,328246
omega2:	0,1959				

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,01532

Levene's test, from medians p (same): 0,1023

Welch F test in the case of unequal variances: F=6,181, df=10,7, p=0,03078

Tukey's Pairwise	RL	RR
RL		0,02973
RR	3,355	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	4,86
Hc (tie corrected):	4,86
p (same):	0,02749

Mann-Whitney Pairwise	RL	RR
RL		0,03049
RR	0,03049	

Dunn's post hoc	RL	RR
RL		0,02749
RR	0,02749	

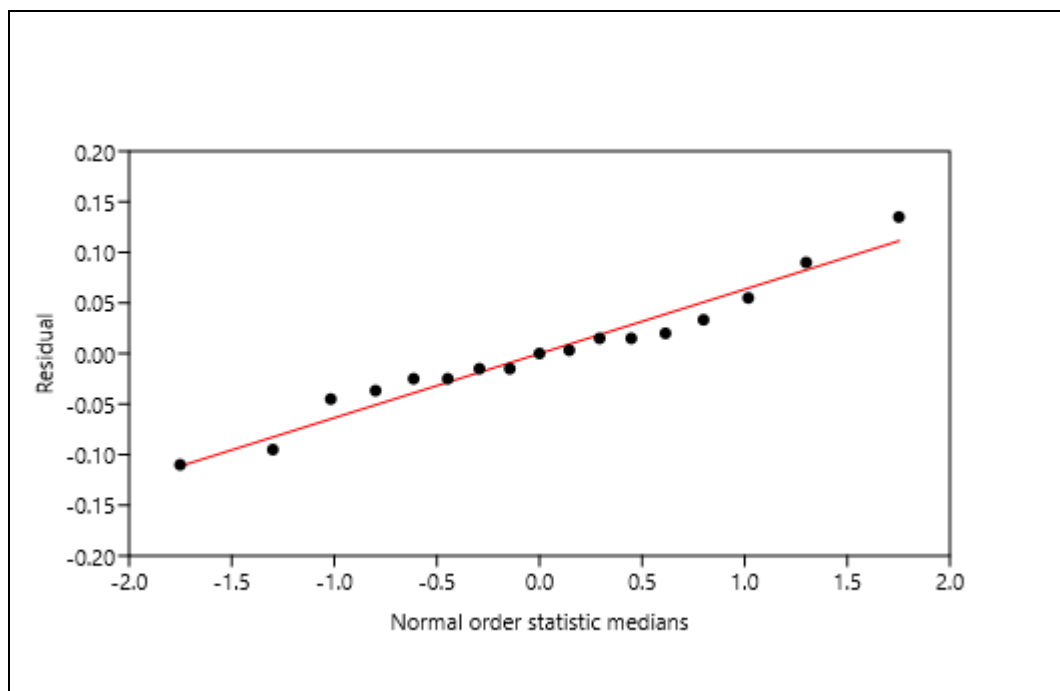
Relatório das análises estatísticas, realizadas no *software* PAST 4,03®, para as variáveis aleatórias avaliadas no Capítulo 3 que apresentaram diferenças significativas entre os diferentes usos do solo.

Macroporosidade

	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
	0,27	0,11	0,21	0,07
	0,14	0,09	0,28	0,15
	0,25	0,15	0,25	0,15
	0,34	0,19		0,18
				0,14
				0,30
Média	0,25	0,14	0,25	0,17
Desvio Padrão	0,08	0,04	0,04	0,08

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9661; p (Normal) = 0,7470



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	0.0397892	3	0.0132631	2.998	0.0694
Within groups:	0.0575167	13	0.0044244		
Total:	0.0973059	16	0.0729		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0.00212629	Var(error):	0.00442436	ICC:	0.3246
omega2:	0.2607				

Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	0.7593
Levene's test, from medians	p (same):	0.8271

Welch F test in the case of unequal variances: F=4.601, df=6.77, p=0.04605

Tukey's Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0.1170	0.9999	0.2447
Lavoura	3.4580		0.1750	0.8958
Mata	0.0928	3.1090		0.3453
Pomar	2.8000	0.9881	2.4560	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	5.652
Hc (tie corrected):	5.694
p (same):	0.1275

Mann-Whitney Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0.1124	1	0.2835
Lavoura	0.1124		0.05183	0.7461
Mata	1	0.05183		0.1539
Pomar	0.2835	0.7461	0.1539	

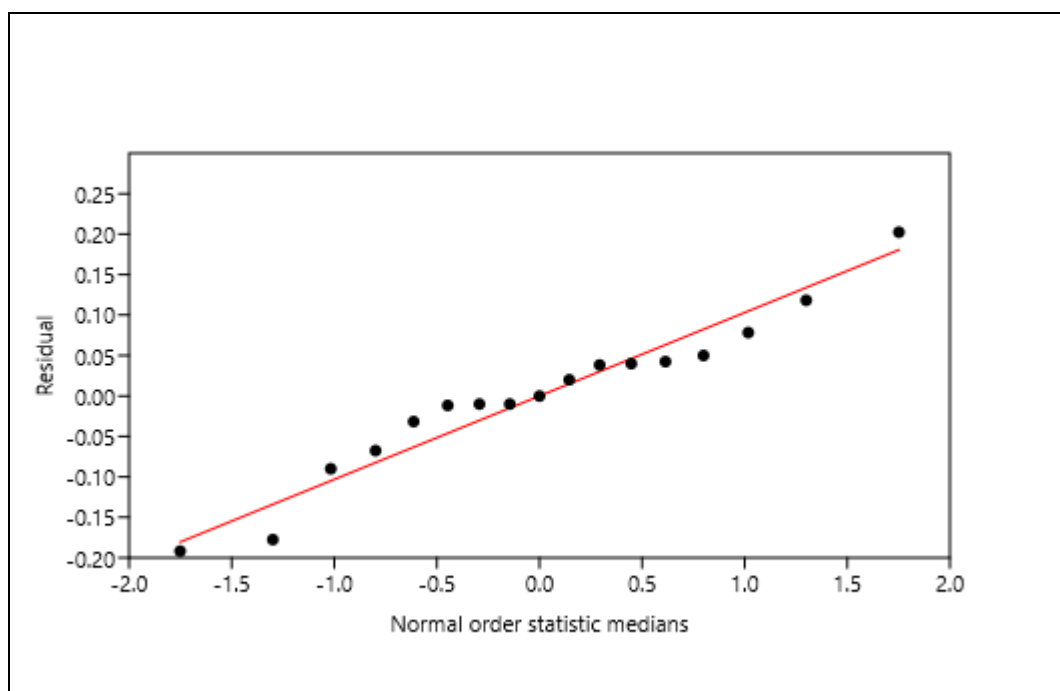
Dunn's post hoc	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0.0677	0.8283	0.1582
Lavoura	0.0677		0.0563	0.5551
Mata	0.8283	0.0563		0.1279
Pomar	0.1582	0.5551	0.1279	

Densidade do solo

	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
	1,38	1,31	1,12	1,16
	1,33	1,42	1,12	1,34
	1,37	1,20	1,15	1,32
	1,24	1,58	-	1,43
	-	-	-	1,47
	-	-	-	1,39
Média	1,33	1,38	1,13	1,31
Desvio Padrão	0,06	0,16	0,02	0,11

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9573; p (Normal) = 0,5808



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	0,12723	3	0,04241	3,647	0,0417
Within groups:	0,15116	13	0,01163		
Total:	0,27839	16	0,04467		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,0074	Var(error):	0,01163	ICC:	0,3891
Omega2:	0,3184				

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,1326

Levene's test, from medians p (same): 0,1414

Welch F test in the case of unequal variances: F=17.36, df=6.273, p=0.001955

Tukey's Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,9229	0,1203	0,9891
Lavoura	0,8810		0,0441	0,9818
Mata	3,4340	4,2500		0,0525
Pomar	0,4402	0,5249	4,1110	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	7,225
Hc (tie corrected):	7,234
p (same):	0,0648

Mann-Whitney Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,8852	0,0497	0,5940
Lavoura	0,8852		0,0497	0,9151
Mata	0,0497	0,0497		0,0275
Pomar	0,5940	0,9151	0,0275	

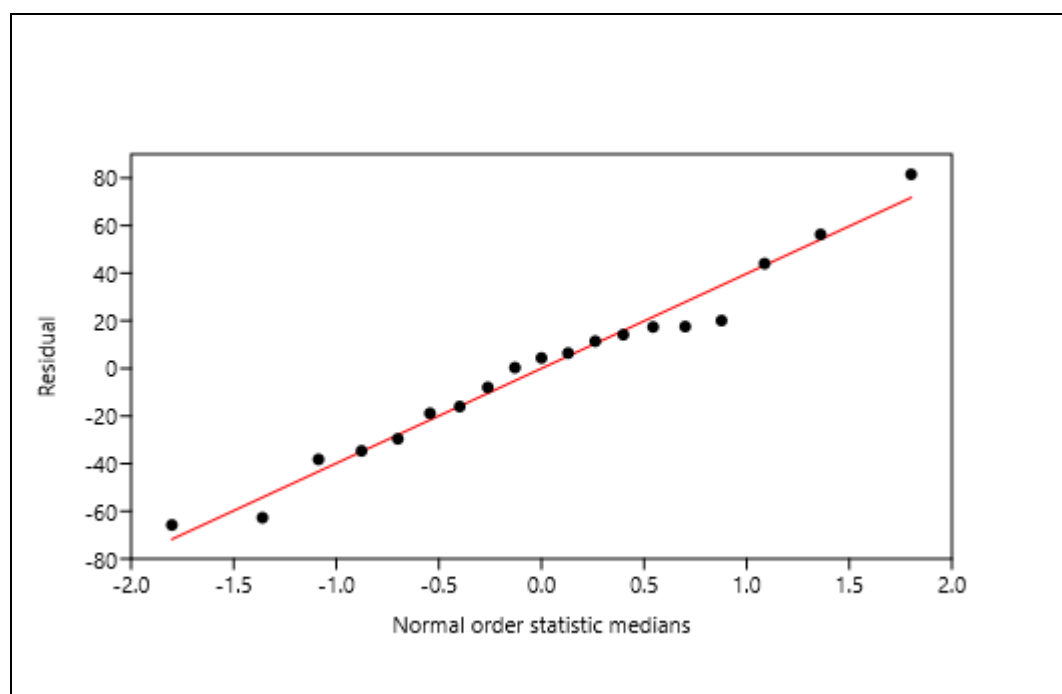
Dunn's post hoc	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,7261	0,0517	0,6452
Lavoura	0,7261		0,0232	0,9388
Mata	0,0517	0,0232		0,0117
Pomar	0,6452	0,9388	0,01167	

β -glicosidase

	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
	96,39	124,84	137,79	152,64
	129,99	203,53	282,06	204,56
	104,43	129,90	181,61	162,45
	118,85	179,57	-	82,48
	-	-	-	165,68
	-	-	-	148,60
	-	-	-	110,03
	-	-	-	159,69
Média	112,42	159,46	200,49	148,27
Desvio Padrão	14,96	38,38	73,96	37,06

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9759; p (Normal) = 0,8846



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	13646,1	3	4548,71	2,661	0,0858
Within groups:	25644,2	15	1709,61		
Total:	39290,3	18	0,06854		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	632,142	Var(error):	1709,61	ICC:	0,2699
Omega2:	0,2077				

Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	0,1087
Levene's test, from medians	p (same):	0,3779

Welch F test in the case of unequal variances: F=3,313, df=5,713, p=0,1028

Tukey's Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,4032	0,0595	0,5091
Lavoura	2,2760		0,5569	0,9701
Mata	3,9440	1,8370		0,2832
Pomar	2,0020	0,6252	2,6380	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi ²):	6,117
Hc (tie corrected):	6,117
p (same):	0,106

Mann-Whitney Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,1124	0,0518	0,1066
Lavoura	0,1124		0,3768	0,7989
Mata	0,0518	0,3768		0,3583
Pomar	0,1066	0,7989	0,3583	

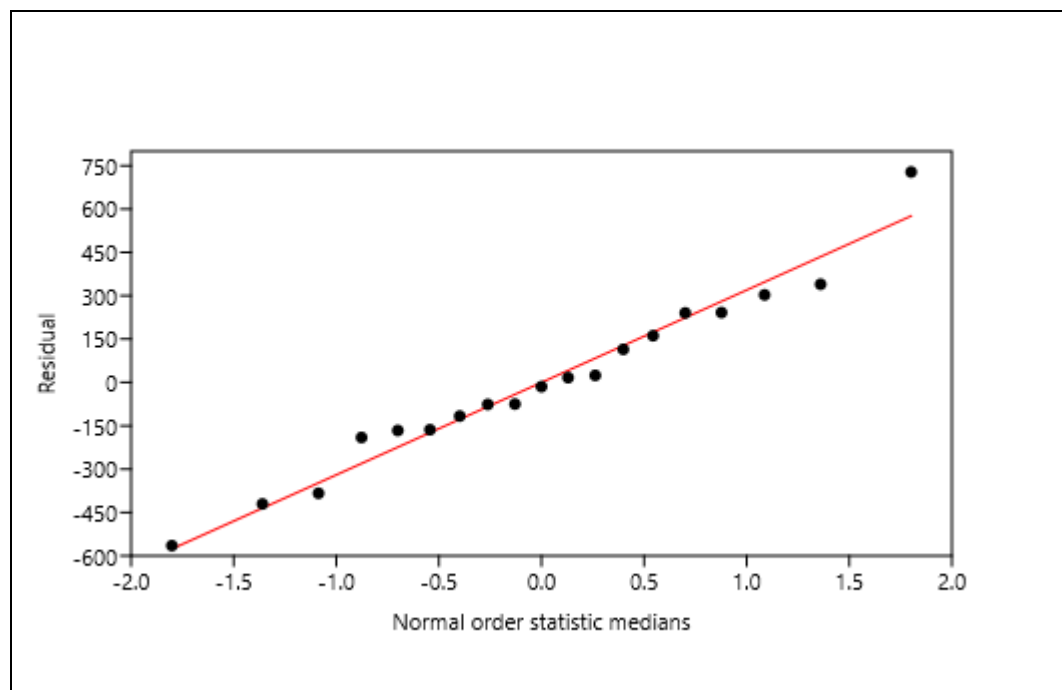
Dunn's post hoc	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,0898	0,0180	0,0882
Lavoura	0,0898		0,4266	0,7996
Mata	0,0180	0,4171		0,2049
Pomar	0,0961	0,7996	0,2600	

Arilsulfatase

	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
	743,32	433,80	1.766,68	361,57
	960,94	531,45	3.059,44	1.084,99
	643,05	402,61	2.167,74	615,56
	528,39	300,62	-	707,11
	-	-	-	943,45
	-	-	-	398,23
	-	-	-	1.022,41
	-	-	-	606,69
	-	-	-	1.121,52
Médias	718,93	417,12	2331,29	781,86
Desvio Padrão	183,69	95,10	661,72	304,32

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9769; p (Normal) = 0,9003



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	7,30x10 ⁻⁶	3	2,43x10 ⁻⁶	22,08	9,33x10 ⁻⁶
Within groups:	1,65x10 ⁻⁶	15	104.979,0		
Total:	8,95x10 ⁻⁶	18	1,20x10 ⁻⁴		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	516972	Var(error):	110159	ICC:	0,8243
Omega2:	0,7689				

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,0088

Levene's test, from medians p (same): 0,1048

Welch F test in the case of unequal variances: F=10,18, df=5,844, p=0,009704

Tukey's Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,5851	6,81x10 ⁻⁰⁵	0,9893
Lavoura	1,8190		1,18x10 ⁻⁰⁶	0,3137
Mata	8,9950	10,6800		2,74x10 ⁻⁵
Pomar	0,4379	2,5380	9,7520	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	10,25
Hc (tie corrected):	10,25
p (same):	0,0166

Mann-Whitney Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,0606	0,0518	0,7989
Lavoura	0,0606		0,0518	0,1066
Mata	0,0518	0,0518		0,0189
Pomar	0,7989	0,1066	0,0189	

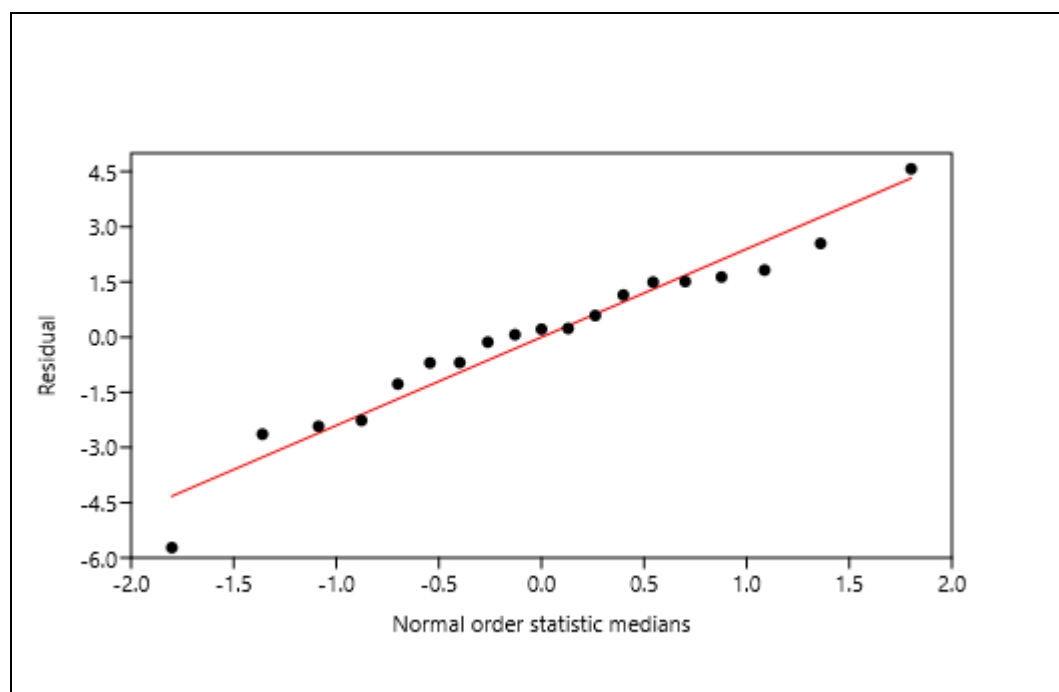
Dunn's post hoc	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,1669	0,0549	0,9422
Lavoura	0,1699		0,0014	0,0952
Mata	0,0549	0,0014		0,0357
Pomar	0,9422	0,0952	0,0357	

FDA – Diacetato de fluoresceína

	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
	8,26	7,27	7,97	8,40
	12,41	7,99	18,27	6,07
	10,20	6,71	14,84	5,91
	12,72	7,64	-	9,97
	-	-	-	8,55
	-	-	-	7,06
	-	-	-	10,88
	-	-	-	9,83
Médias	10,90	7,40	13,69	8,33
Desvio Padrão	2,09	0,55	5,24	1,85

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9647; p (Normal) = 0,6683



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	89,033	3	29,6775	4,785	0,0156
Within groups:	93,040	15	6,2026		
Total:	182,073	18	0,1791		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	5,2268	Var(error):	6,2027	ICC:	0,4573
Omega2:	0,3741				

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,0120

Levene's test, from medians p (same): 0,100

Welch F test in the case of unequal variances: F=34,12; df=5,492; p=0,0730

Tukey's Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,8327	0,4785	0,3669
Lavoura	2,807		0,0222	0,9271
Mata	2,079	4,6770		0,0284
Pomar	2,377	0,8635	4,4950	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	7,211
Hc (tie corrected):	7,211
p (same):	0,0655

Mann-Whitney Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,0304	0,5959	0,1066
Lavoura	0,0304		0,1116	0,4447
Mata	0,5959	0,1116		0,1846
Pomar	0,1066	0,4447	0,1846	

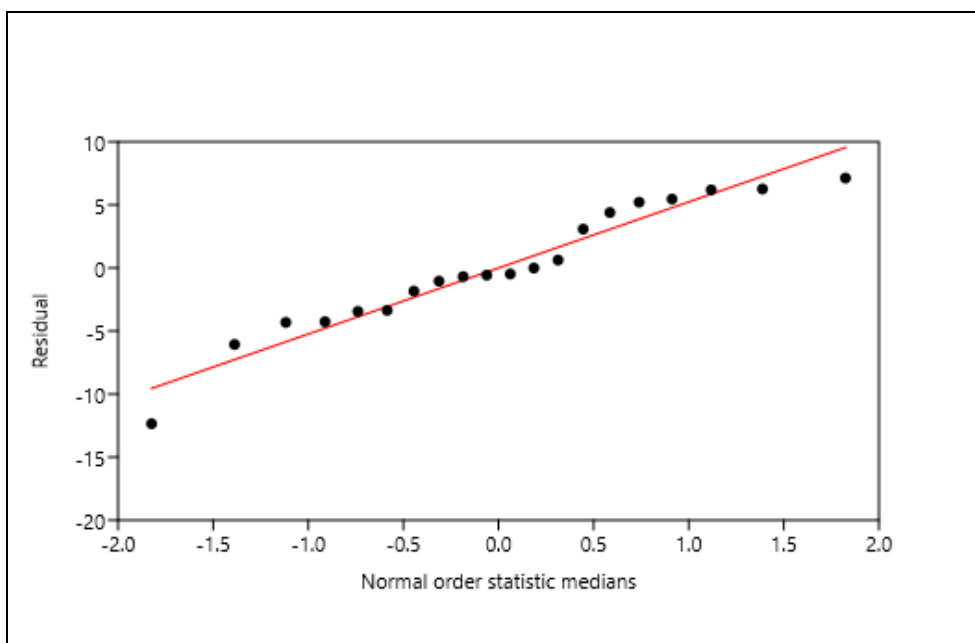
Dunn's post hoc	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,0327	0,8767	0,1105
Lavoura	0,0327		0,0329	0,3840
Mata	0,8767	0,0329		0,1055
Pomar	0,1105	0,3840	0,1055	

COT – Carbono orgânico total

	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
	14,09	15,10	25,51	21,79
	16,51	15,19	44,99	24,97
	18,98	12,30	43,08	18,02
	23,81	20,06	-	12,64
	-	-	-	24,89
	-	-	-	15,26
	-	-	-	18,70
	-	-	-	17,66
	-	-	-	14,39
Médias	18,35	15,66	37,86	19,35
Desvio Padrão	4,15	3,22	10,74	4,41

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,9436; p (Normal) = 0,3055



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	1.032,3800	3	344,1250	11,03	0,00044
Within groups:	468,1660	15	31,2122		
Total:	1.511,5400	18	0,0009		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	67,6723	Var(error):	31,2111	ICC:	0,6906
Omega2:	0,6129				

Levene's test for homogeneity of variance, from means

p (same): 0,0316

Levene's test, from medians

p (same): 0,5544

Welch F test in the case of unequal variances: F=3,431, df=5,834, p=0,09516

Tukey's Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,9032	0,0019	0,9989
Lavoura	0,9912		0,0006	0,7913
Mata	6,4670	7,3570		0,0007
Pomar	0,2005	1,3100	7,1150	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	8,274
Hc (tie corrected):	8,274
p (same):	0,0407

Mann-Whitney Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,4705	0,0518	0,9323
Lavoura	0,4705		0,0518	0,2696
Mata	0,0518	0,0518		0,0189
Pomar	0,9323	0,2696	0,0189	

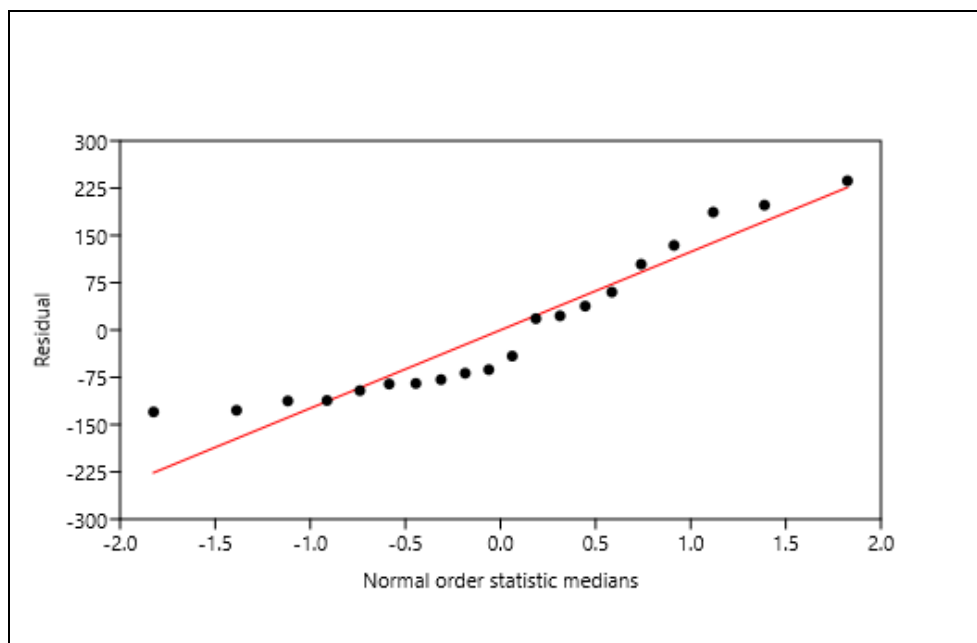
Dunn's post hoc	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,4509	0,0363	0,8846
Lavoura	0,4509		0,0052	0,3098
Mata	0,0363	0,0052		0,02575
Pomar	0,8846	0,3098	0,02249	

C-POx – Carbono oxidável por permanganato

	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
	684,40	654,39	922,71	908,75
	528,21	650,13	1206,32	958,65
	555,74	553,28	895,90	637,27
	728,44	669,96		659,18
				594,67
				856,16
				680,65
				592,11
				610,21
Médias	624,20	631,94	1008,31	790,96
Desvio Padrão	97,28	53,13	172,01	144,61

Teste de Shapiro-Wilk

W = 0,8851; p (Normal) = 0,0219



Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	316051	3	105.350,0	6,401	0,0047
Within groups:	263324	16	16.457,8		
Total:	579375	19	0,00833		

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	19185,4	Var(error):	16457,8	ICC:	0,5383
omega2:	0,4476				

Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	0,0490
Levene's test, from medians	p (same):	0,6197

Welch F test in the case of unequal variances: F=4,263, df=6,09, p=0,06102

Tukey's Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,9998	0,0060	0,5950
Lavoura	0,1207		0,0071	0,6548
Mata	5,5440	5,4320		0,0192
Pomar	1,7930	1,6510	4,7350	

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	6,715
Hc (tie corrected):	6,715
p (same):	0,0816

Mann-Whitney Pairwise	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,8852	0,0518	0,3961
Lavoura	0,8852		0,0518	0,4875
Mata	0,0518	0,0518		0,0645
Pomar	0,3961	0,4875	0,0645	

Dunn's post hoc	Campo	Lavoura	Mata	Pomar
Campo		0,9523	0,0233	0,4300
Lavoura	0,9523		0,0201	0,3901
Mata	0,0233	0,0201		0,0591
Pomar	0,4300	0,3901	0,0591	

Tabela 1 – Índices da correlação linear de Pearson e nível de significância (p-valor), de variáveis químicas, físicas e biológicas, de amostras coletadas em 2025, na camada superficial do solo (0-10 cm)

	FDA	β-Glicosidase	Arilsulfatase	COT	Cpox	pH	Areia	Argila	Ds	Ma	Mi	PT
FDA		0,2084	0,0005	0,0011	0,0940	0,0232	0,2782	0,1155	0,1243	0,0194	0,5358	0,0927
β-Glicosidase	0,2940		0,0065	0,0013	0,0003	0,0583	0,2310	0,2037	0,2207	0,6560	0,9187	0,5276
Arilsulfatase	0,7095	0,5874		0,0000	0,0002	0,7391	0,0319	0,0317	0,0160	0,0417	0,7873	0,0617
COT	0,6737	0,6674	0,8452		0,0000	0,7530	0,0542	0,0385	0,0090	0,0852	0,6607	0,1967
Cpox	0,3847	0,7200	0,7417	0,8507		0,7193	0,0355	0,0248	0,0048	0,5116	0,6477	0,1505
pH	-0,5047	0,4302	-0,0795	-0,0751	0,0857		0,9012	0,9122	0,4576	0,1053	0,8257	0,1136
Areia	-0,2549	-0,2805	-0,4808	-0,4368	-0,4724	0,0297		0,0010	0,0037	0,9839	0,0704	0,0064
Argila	0,3632	0,2969	0,4811	0,4657	0,4998	0,0263	-0,6785		0,0001	0,5788	0,0051	0,0005
Ds	-0,3552	-0,2865	-0,5308	-0,5676	-0,6037	0,1761	0,6176	-0,7758		0,6617	0,0183	0,0000
Ma	0,5177	0,1062	0,4591	0,3945	0,1559	-0,3730	-0,0048	-0,1321	-0,1043		0,0003	0,6227
Mi	-0,1472	0,0244	-0,0644	-0,1046	0,1089	0,0526	-0,4129	0,6009	-0,5218	-0,7229		0,0051
PT	0,3860	0,1501	0,4251	0,3013	0,3337	-0,3650	-0,5882	0,7080	-0,8727	0,1172	0,6012	

Fonte: elaborado pelo autor

Anexos

Anexo A – Descrição morfológica dos perfis

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Dissertação Lucas da Silva Barbosa

PERFIL- N° - 01

DATA – 03/12/2020

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário A moderado, textura franco-arenosa fase relevo ondulado substrato granito. WRB: Dystric Leptosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul, 31°33'55.09"S e 52°28'50.08"O.



SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL - Descrito e coletado em trincheira aberta no campo, declive ondulado e campo sujo

ELEVAÇÃO – 177 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granitóide

PEDREGOSIDADE- Ligeiramente pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL - Ondulado

RELEVO REGIONAL- Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subcaducifólia

USO ATUAL – Campo Sujo

DESCRITO E COLETADO POR – Jeferson Diego Leidemer, Lucas da Silva Barbosa, Pablo Miguel e Stefan Domingues Nachtigall.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 01

A	0-10/7 cm; bruno-escuro (7,5YR 3,5/2, úmida) e bruno (7,5YR 5/2, seca); franco-arenosa; blocos subangulares pequena moderada a fraca e granular pequena moderada a fraca; ligeiramente dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e ondulada.
Cr1	10/7 – 22 cm; cinzento-avermelhado (5YR 4/2, úmida) e bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, seca). franco-arenosa; Saprolito: (5YR 8/4, úmida) e (7,5YR 8,5/2 e 10YR 9/1, seca); estrutura do saprolito blocos subangulares pequena a média forte; transição ondulada e clara.
Cr2	22 – 43/33 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmida) e bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, seca). franco-arenosa; Saprolito: (7,5 YR 3/2 e 7,5YR 7/4) e (10YR 6,5/4); estrutura do saprolito blocos subangulares pequena a média forte; transição ondulada e clara;
R	43/33 – 49+ cm;

OBSERVAÇÕES: O saprolito apresenta alta porosidade e é facilmente quebrável com a mão. No horizonte Cr encontramos fraturamentos, verticais e horizontais, que variam de 0,5 a 1 cm, preenchidos com inclusões de material dos horizontes superiores do perfil, possivelmente do horizonte A, material este de coloração escura e rico em matéria orgânica.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 1

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm
A	0-10/7	0	37	63
Cr1	10/7 – 22	39	41	20
Cr2	22 – 43/33	22	59	19

Horizonte		Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)				Argila Dispersa (g kg ⁻¹)	Grau de Floculação (%)	Silte/ Argila
Símbolo	Prof. (cm)	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
A	0-10/7	253	400	270	77	27,5	64,3	3,5
Cr1	10/7-22	243	348	285	125	57,3	53,7	2,3
Cr2	22-43/33	218	320	303	158	82,8	82,8	1,9

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH 7
A	5,49	4,37	3,81	1,58	0,42	0,09	5,81	0,37	7,15	12,95
Cr1	5,41	4,06	1,62	0,55	0,22	0,06	2,38	1,31	6,65	9,03
Cr2	5,56	4,18	2,27	0,69	0,12	0,10	3,08	1,51	6,88	9,96

Horizonte	V (%)	Al (%)	P (mg kg ⁻¹)	C Org..(g kg ⁻¹)
A	44,8	6,0	7,4	23,3
Cr1	26,4	35,5	3,4	9,9
Cr2	30,9	32,8	2,8	10,1

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Dissertação Lucas da Silva Barbosa

PERFIL N° - 02

DATA – 09/12/2020

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO LITÓLICO Chernossólico fragmentário A chernozêmico, textura franco-arenosa fase relevo ondulado substrato granito.

WRB: Mollic Leptosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS

– Pelotas, Rio Grande do Sul, 31°33'56.62"S e 52°28'44.92"O.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL - Descrito e coletado em trincheira aberta no campo, declive ondulado e uso atual lavoura.

ELEVAÇÃO – 112 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granitóide

PEDREGOSIDADE- Ligeiramente pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL - Ondulado

RELEVOREGIONAL - Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subcaducifólia

USO ATUAL – Lavoura/resteva azevem

DESCRITO E COLETADO POR – Jeferson Diego Leidemer, Lucas da Silva Barbosa, Pablo Miguel e Stefan Domingues Nachtigall.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 02

Ap	0-7 cm; cinzento muito escuro (5YR 3/1, úmida) e bruno (7,5YR 4/2, seca); franco-arenosa; blocos subangulares média moderada e granular pequena moderada; ligeiramente dura, friável; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
A2	7-20/26 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2, úmida) e bruno (7,5YR 4/2, seca); franco-argiloarenosa; blocos angulares e subangulares média moderada e granular pequena a moderada; ligeiramente dura, friável; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
Cr	20/26-30/40 cm; bruno muito claro-acinzentado (2,5 Y/1, cor úmida) e bruno-forte (7,5YR 5/6, seca); argila; estrutura do saprolito blocos subangulares pequena a média forte; transição ondulada e abrupta;
R	40/30-45+ cm

OBSERVAÇÕES: Não foi possível identificar o fraturamento, inclusões do horizonte A ou material mais escuro no Cr. Também não é possível identificar as fraturas no material de origem, mesmo quando escavado até 60 cm, no entanto, identifica-se que os horizontes saprolíticos apresentam aumento no conteúdo de argila.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 2

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade(cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm
Ap	0-7	0	27	73
A2	7-20/26	0	36	64
Cr	20/26-30/40	6	75	19

Horizonte		Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)				Argila Dispersa (g kg ⁻¹)	Grau de Floculação (%)	Silte/Argila
Símbolo	Prof. (cm)	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
Ap	0-7	302	263	311	124	43,9	64,6	2,5
A2	7-20/26	275	398	130	197	107,6	45,5	0,7
Cr	20/26-30/40	217	217	206	427	58,4	74,8	0,5

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH 7
Ap	6,28	5,28	6,29	3,33	0,29	0,10	9,92	0,05	4,15	14,06
A2	6,01	4,64	3,43	1,81	0,10	0,09	5,35	0,11	3,72	9,06
Cr	5,79	3,99	5,42	3,33	0,12	0,18	8,87	1,90	5,42	14,29

Horizonte	V (%)	Al (%)	P (mg kg ⁻¹)	C Org. (g kg ⁻¹)
Ap	70,5	0,5	10,5	22,7
A2	59,0	2,1	2,9	8,7
Cr	62,1	17,6	2,4	6,8

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO - Dissertação Lucas da Silva Barbosa
PERFIL N° - 03

DATA – 23/04/2021

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO
Eutrófico leptofragmentário A proeminente, textura franco-arenosa fase relevo forte ondulado substrato granito.

WRB: Leptic Regosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E

COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul,
31°34'1.32"S e 52°28'43.91"O.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE

O PERFIL - Descrito e coletado em corte de estrada, declive forte ondulado e uso atual lavoura.

ELEVAÇÃO – 101 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granitóide

PEDREGOSIDADE - Moderadamente pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL – Forte ondulado

RELEVO REGIONAL - Forte Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subcaducifólia

USO ATUAL – Lavoura/pomar de pêssago

DESCRITO E COLETADO POR – Jeferson Diego Leidemer, Lucas da Silva Barbosa, Maria Bertaso de Garcia Fernandez e Pablo Miguel.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 03

A1	0-20 cm; cinzento muito escuro (5YR 3/1, úmida) e cinzento-avermelhado-escuro (5YR 4/2, seca); franco-arenosa cascalhenta; blocos subangulares médios a grandes moderada e granular média moderada; ligeiramente dura, friável a muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
A2	20-35/45 cm; cinzento muito escuro (5YR 3/1, úmida) e cinzento-avermelhado-escuro (5YR 4/2, seca); franco-arenosa cascalhenta; blocos subangulares grandes a muito grandes moderada e granular média moderada; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e abrupta.
Cr1	35/45 - 50/58 cm; bruno (7,5YR 4/3, úmida) e bruno-avermelhado (5YR 5/4, seca); franco-arenosa; estrutura do saprolito blocos subangulares pequena a média forte; transição ondulada e abrupta.
Cr2	50/58 – 73/83 cm; bruno (7,5YR 4/4, úmida) e mosqueado amarelo-avermelhado (7,5YR 7/8, úmida) e avermelhado-amarelado (5YR 5/6, seca); franco-argilosa; estrutura do saprolito blocos subangulares pequena a média forte; transição descontínua e abrupta.
CR	73/83 – 97 + cm.

OBSERVAÇÕES: Raízes são comuns nos horizontes A1 e A2, com predomínio de raízes finas, mas também ocorrem raízes de maior diâmetro. Onde o Horizonte Cr1 adentra o Horizonte CR encontra-se a presença de raízes. Horizonte A1 e A2 apresentam intensa atividade biológica, principalmente de cupins e formigas. Nos horizontes Cr1 e Cr2 identifica-se de forma nítida o fraturamento do saprolito e preenchimento das fraturas com material possivelmente advindo dos horizontes superficiais e/ou resultado do intemperismo in loco.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 3

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm
A1	0-20	1	43	56
A2	20-35/45	0	44	56
Cr1	35/45 - 50/58	14	47	38
Cr2	50/58 – 73/83	0	64	36

Horizonte		Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)				Argila Dispersa (g kg ⁻¹)	Grau de Floculação (%)	Silte/ Argila
Símbolo	Prof. (cm)	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
A1	0-20	375	231	263	130	61,5	55,3	2,0
A2	20-35/45	408	239	227	127	84,3	53,9	1,8
Cr1	35/45 - 50/58	501	152	227	121	84,5	51,7	1,9
Cr2	50/58 – 73/83	357	78	166	398	14,1	85,4	0,4

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH 7
A1	5,57	4,34	4,65	1,51	0,13	0,11	6,40	0,94	6,28	12,68
A2	5,78	4,41	3,94	0,99	0,32	0,16	5,41	0,78	5,38	10,79
Cr1	5,87	4,29	2,69	0,98	0,05	0,14	3,86	1,17	3,92	7,78
Cr2	5,82	4,20	4,86	2,34	0,08	0,17	7,45	1,65	5,08	12,53

Horizonte	V (%)	Al (%)	P (mg kg ⁻¹)	C Org. (g kg ⁻¹)
A1	50,5	13,0	19,5	15,8
A2	50,1	12,9	12,0	12,5
Cr1	49,6	23,8	2,4	5,7
Cr2	59,5	18,5	2,6	5,0

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Dissertação Lucas da Silva Barbosa

PERFIL N° - 04

DATA – 30/04/2021

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico leptofragmentário A moderado, textura franco-arenosa fase relevo ondulado substrato granito.

WRB: Leptic Regosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS

– Barranco da estrada, Pelotas, Rio Grande do Sul, 31°34'1.83"S e 52°28'41.98"O.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL-

Descrito e coletado em corte na estrada, declive ondulado e uso atual lavoura.

ELEVAÇÃO – 94 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granitóide

PEDREGOSIDADE- Não pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL - Ondulado

RELEVO REGIONAL- Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subcaducifólia

USO ATUAL – Lavoura/Pomar de pêssego

DESCRITO E COLETADO POR – Jeferson Diego Leidemer, Lucas da Silva Barbosa e Pablo Miguel.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A1	0-20 cm; bruno-amarelado-escuro (5YR 3/2, úmida) e bruno (7,5YR 4/2, seca); franco-arenosa; blocos angulares e subangulares pequena a média fraca; ligeiramente dura, friável a muito friável ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
A2	20-33/48 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2, úmida) e bruno (7,5YR 4/2, seca); franco-arenosa; blocos angulares e subangulares pequena a média fraca; ligeiramente dura, muito friável; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
AC	33/48-45/52 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/2, úmida) e bruno-escuro (7,5YR 3/2, seca); franco-argiloarenosa; blocos angulares e subangulares pequena a média fraca; ligeiramente dura, muito friável ligeiramente plástica a plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição ondulada e clara.
Cr	45/52-75/94 cm; bruno-escuro (7,5YR 3/4, úmida) e bruno-avermelhado (5YR 5/4, seca) e mosqueado bruno-forte (7,5YR 5/8, úmida); argila; estrutura do saprolito blocos subangulares pequena a média forte; transição descontínua e abrupta.
R/Cr	75/94-94+ cm.

OBSERVAÇÕES: Raízes são muitas nos horizontes A1, A2 e AC, com a presença de raízes finas, mas também com diâmetro de 0,5 a 1 cm de diâmetro. No horizonte Cr as raízes são comuns até os 90 cm de profundidade, onde o Cr adentra o R. Intensa atividade biológica presente nos horizontes superficiais, principalmente cupins e formigas. Não é possível descrever o fraturamento, mas sim visualizar material mais argiloso nos horizontes saprolíticos.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 4

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm
A1	0-20	0	20	80
A2	20-33/48	0	6	94
AC	33/48-45/52	1	41	58
Cr	45/52-75/94	0	56	44

Horizonte		Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)				Argila Dispersa (g kg ⁻¹)	Grau de Floculação (%)	Silte / Argila
Símbolo	Prof. (cm)	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
A1	0-20	384	227	252	137	47,8	57,3	1,9
A2	20-33/48	365	232	249	154	93,1	62,1	1,6
AC	33/48-45/52	334	214	242	211	129,1	72,3	1,2
Cr	45/52-75/94	273	117	169	440	46,3	86,7	0,4

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH 7
A1	5,54	4,60	2,89	1,31	0,15	0,07	4,35	0,65	6,45	10,80
A2	5,80	4,62	2,87	1,18	0,10	0,07	4,15	0,42	5,15	9,30
AC	5,88	4,55	3,29	1,67	0,07	0,09	5,02	0,71	5,35	10,37
Cr	5,82	4,50	6,05	3,32	0,08	0,15	9,45	1,04	5,28	14,73

Horizonte	V (%)	Al (%)	P (mg kg ⁻¹)	C Org. (g kg ⁻¹)
A1	40,3	13,0	5,9	15,7
A2	44,7	9,2	3,0	10,8
AC	48,4	12,4	3,1	9,7
Cr	64,2	9,9	2,1	10,6

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Dissertação Lucas da Silva Barbosa
PERFIL N° - 05

DATA – 07/05/2021

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO
Distrófico leptofragmentário A moderado, textura franco-arenosa fase relevo ondulado substrato granito.

WRB: Leptic Regosols

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E

COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul,
31°34'3.20"S e 52°28'40.25"O. S31 34 3.20 W52
28 40.25

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE

O PERFIL- Descrito e coletado em corte na estrada, declive ondulado e uso atual lavoura.

ELEVAÇÃO – 87 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granitóide

PEDREGOSIDADE- Ligeiramente pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL - Ondulado

RELEVO REGIONAL- Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subcaducifólia

USO ATUAL – Lavoura/pomar de pêssago

DESCRITO E COLETADO POR – Jeferson Diego Leidemer, Lucas da Silva Barbosa, Maria Bertaso de Garcia Fernandez e Pablo Miguel.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A	0-23 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2, úmida) e bruno (7,5YR 4/3, seca); franco-arenosa; blocos subangulares muito pequena fraca e granular pequena e muito pequena fraca; ligeiramente dura, muito friável não plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
AC	23-45/54 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2, úmida) e bruno (7,5YR 4/4, seca); franco-arenosa cascalhenta; blocos subangulares muito pequena fraca e granular muito pequena fraca; ligeiramente dura, firme, não plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
Cr1	45/54 -67 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3, úmida) e bruno (7,5YR 4/3, seca); franco-arenosa; estrutura do saprolito blocos angulares e subangulares pequena a média forte; transição plana e clara.
R/Cr2	67-70/97+ cm; vermelho-escuro (2,5 YR 3/6, úmida) e vermelho (2,5YR 4/6, seca); franco-argilosa; estrutura do saprolito blocos angulares e subangulares média a grande forte; transição descontínua e clara.
R	70/97+ cm.

OBSERVAÇÕES: As raízes muitas nos horizontes A e AC, e comuns nos horizontes Cr1 e R/Cr2. É possível visualizar fraturamentos no Cr1 ou R/Cr2, no entanto, observam-se inclusões argilosas de diferentes colorações em Cr1 e R/Cr2.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 5

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm
A	0-23	1	21	78
A/C	23-45/54	0	39	61
Cr1	45/54 -67	0	49	51
R/Cr2	67-70/97	0	35	65

Horizonte		Composição Granulométrica g kg ⁻¹				Argila Dispersa (g kg ⁻¹)	Grau de Floculação (%)	Silte/Argila
Símbolo	Prof. (cm)	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
A	0-23	403	267	220	110	48,8	46,8	2,0
A/C	23-45/54	481	228	177	114	73,4	48,6	1,6
Cr1	45/54 -67	454	189	241	116	89,3	49,8	2,1
R/Cr2	67-70/97	319	85	197	399	6,6	85,4	0,5

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH 7
A	5,61	4,51	1,86	1,03	0,15	0,05	3,04	0,78	4,85	7,88
A/C	5,67	4,44	1,48	0,66	0,10	0,04	2,24	0,87	4,55	6,79
Cr1	5,77	4,40	1,63	0,71	0,18	0,04	2,52	1,49	3,58	6,10
R/Cr2	5,56	4,43	2,22	2,18	0,09	0,09	4,49	3,24	5,75	10,24

Horizonte	V (%)	Al (%)	P (mg kg ⁻¹)	C Org. (g kg ⁻¹)
A	38,5	20,4	10,2	11,6
A/C	33,0	28,1	4,3	9,3
Cr1	41,3	37,2	2,2	4,8
R/Cr2	43,9	41,9	2,0	2,9

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Lucas da Silva Barbosa

PERFIL N° - 06

DATA – 24/05/2021

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO LITÓLICO

Chernossólico fragmentário A moderado, textura franco-arenosa fase relevo ondulado substrato granito.

WRB: Mollic Leptosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E

COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul, 31°33'56.74"S e 52°28'48.23"O.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL- Descrito e coletado em trincheira aberta no campo, declive ondulado e uso atual lavoura.

ELEVAÇÃO – 116 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granitóide

PEDREGOSIDADE- Ligeiramente pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL – Ondulado

RELEVO REGIONAL - Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subcaducifólia

USO ATUAL – Lavoura/pomar de pêssego

DESCRITO E COLETADO POR – Lucas da Silva Barbosa, Pablo Miguel e Stefan Domingues Nachtigall.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A	0-20/22 cm; cinzento muito escuro (10YR 3/1, úmida) e bruno-escuro (7,5YR 3/2 seca); franco-arenosa pouco cascalhenta; blocos angulares e subangulares média a grande/muitogrande moderada; ligeiramente dura, friável plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
Cr/A	20/22-35/50 cm; preto (10YR 2/1, úmida) e mosqueado bruno amarelado (10YR 5/6, úmida) e cinzento muito escuro (5YR 3/1, seca); franco-arenosa; blocos angulares e subangulares média a grande/muito grande moderada e granular muito pequena forte; ligeiramente dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
RCr	35/50-58+ cm.

OBSERVAÇÕES: Raízes são comuns no horizonte A, poucas no Cr/A e raras no RCr. Fraturas em RCr são horizontais, preenchidas com material escuro e aparentemente mais argiloso de cor 10YR 2/2 e variam de 1 a 2 cm.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 6

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm
A	0-20/22	0	41	59
Cr/A	20/22-35/50	5	75	20

Horizonte		Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)				Argila Dispersa (g kg ⁻¹)	Grau de Floculação (%)	Silte/Argila
Símbolo	Prof. (cm)	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila			
A	0-20/22	326	239	278	158	72,4	63,0	1,8
Cr/A	20/22-35/50	345	231	230	194	118,5	69,9	1,2

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH7
A	6,09	4,96	6,95	3,24	0,30	0,07	10,56	0,16	5,52	16,08
Cr/A	6,16	4,63	5,55	2,32	0,39	0,09	8,35	0,87	7,15	15,50

Horizonte	V (%)	Al (%)	P (mg kg ⁻¹)	C Org. (g kg ⁻¹)
A	65,7	1,5	3,9	21,1
Cr/A	53,9	9,6	11,3	14,6

DESCRIÇÃO DE PERFIL

Projeto: Dissertação Lucas da Silva Barbosa

PERFIL N° - 07

DATA – 31/05/21

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário A proeminente, textura franco-arenosa fase relevo ondulado substrato granito.

WRB: Umbric Leptosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E

COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul,

31°33'56.88"S e 52°28'49.75"O.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL

- Descrito e coletado em trincheira aberta no campo, declive ondulado e uso atual lavoura.

ELEVAÇÃO – 120 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granitóide

PEDREGOSIDADE- Ligeiramente pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL - Ondulado

RELEVO REGIONAL - Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subcaducifólia

USO ATUAL – Pomar de Pêssego

DESCRITO E COLETADO POR– Adão Pagani Junior, Lucas da Silva Barbosa, Maria Bertaso de Garcia Fernandez e Stefan Domingues Nachtigall.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A	0-23/28 cm; bruno muito escuro (7,5YR 2,5/2, úmida) e bruno-escuro (7,5YR 3/2, seca); franco-arenosa; blocos angulares e subangulares média a grande/muito grande moderada e granular pequena moderada; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e abrupta.
Cr	23/28-46/44 cm; cinzento muito escuro (7,5YR 3/1, úmida) e cinzento muito escuro (7,5YR 3/1, seca) e mosqueado bruno-forte (7,5YR 5/8, úmida); franco-arenosa; estrutura do saprolito blocos angulares e subangulares média forte; transição plana e clara.
CR	46/44+ cm.

OBSERVAÇÕES: No horizonte A as raízes são finas e muitas, enquanto no Cr são finas, muito finas e comuns. Sem a presença de atividade biológica. Fraturas em Cr apresentam-se preenchidas por material escuro proveniente do horizonte A e com sentidos verticais, horizontais e diagonais.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 07

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus (>20mm)	Cascalho (20-2mm)	Terra fina (<2mm)
A	0-23/28	0	33	67
Cr	23/28-46/44	4	76	20

Horizonte		Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)			Argila Dispersa (g kg ⁻¹)	Grau de Flocculação (%)	Silte/Argila
Símbolo	Prof. (cm)	Areia Total	Silte	Argila			
A	0-23/28	607	263	130	62	55,3	2,0
Cr	23/28-46/44	646	227	127	84	53,9	1,8

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH 7
A	5,57	4,30	5,03	1,50	0,18	0,08	6,79	1,26	9,95	16,74
Cr	5,78	4,38	2,97	1,12	0,12	0,11	4,32	2,20	8,75	13,07

Horizonte	V (%)	Al (%)	P (mg kg ⁻¹)	C Org. (g kg ⁻¹)
A	40,6	15,9	7,5	20,0
Cr	33,1	34,3	4,0	14,5

DESCRIÇÃO DE PERFIL

Projeto: Dissertação Adão Pagani Junior

PERFIL N° - 08

DATA – 19/01/2022

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico

A moderado, textura franco-arenosa, relevo ondulado, substrato granito. WRB: Leptic Regosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS –

Pelotas, Rio Grande do Sul, 359405,14m e 6506500,19m.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL -

Descrito e coletado em trincheira aberta na mata logo acima da casa da propriedade

ELEVAÇÃO – 67 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE- Não pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL - Ondulado

RELEVO REGIONAL- Ondulado a forte ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subperenifólia

USO ATUAL – Mata nativa

DESCRITO E COLETADO POR – Luiz Fernando Spinelli Pinto e Pablo Miguel.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 08

A1	0-20 cm; cor úmida (10YR 3/2, úmida) e cor seca (7,5YR 4/2, seca); franco-arenosa; blocos subangulares, pequena, fraca; ligeiramente dura; friável, plástica, ligeiramente pegajosa; clara e plana; raízes grossas e comuns.
A2	20-37 cm; cor úmida (10YR 3/1, úmida) e cor seca (10YR 3/2, seca); franco-arenosa; blocos subangulares, pequena, fraca a moderada; ligeiramente dura; friável, plástica, ligeiramente pegajosa a pegajosa; clara e plana; raízes poucas e grossas.
AC	37-50/58 cm; cor úmida (10YR 3/2, úmida) e cor seca (10YR 4,5/2, seca); franco-arenosa, cascalhenta; dura; friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; clara e ondulada; raízes finas e poucas.
CA/C/CR	50/58-75/80 cm; cor úmida (7,5YR 5/8, úmida), cor seca (10YR 6/3, seca) e mosqueados variando entre (7,5YR 5/3; 10YR 5/6; 7,5YR 4/2, úmida); franco-arenosa, muito cascalhenta; clara e ondulada.
C/CR	75/80-110+ cm; cor úmida (7,5YR 4/4, úmida), cor seca (10YR 6/4, seca) e mosqueados variando entre (7,5YR 3/4, úmida).

Obs: No horizonte AC o cascalho é areia grossa. Linha de pedra descontínua entre horizonte AC e horizonte CA/C/CR. Presença de raízes grossas e comuns no horizonte A1, poucas e grossas no horizonte A2 e finas e poucas no horizonte AC.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 08

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus (>20mm)	Cascalho (20-2mm)	Terra fina (<2mm)
A1	0-20	1	20	79
A2	20-37	1	18	81
AC	37-50/58	0	25	75
CA/C/CR	50/58-75/80	1	58	41
C/CR	75/80-110+	0	60	40

Horizonte	Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)							Silte/Argila
	Areia m. grossa	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Areia m. fina	Silte	Argila	
A1	74,87	120,35	151,03	132,23	54,58	286,25	196,89	1,71
A2	33,11	113,15	155,92	145,84	49,84	257,83	189,34	1,73
AC	124,90	145,62	140,07	137,55	78,02	228,01	135,71	1,68
CA/C/CR	110,59	156,25	111,72	99,88	67,23	289,84	163,99	1,77
C/CR	-	-	-	-	-	-	-	-

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH7
A1	5,53	4,72	3,41	0,75	0,15	0,11	4,42	0,40	8,7	13,12
A2	5,60	4,09	1,73	0,50	0,06	0,12	2,41	0,36	10,7	13,11
AC	5,97	4,02	1,28	0,26	0,05	0,14	1,73	0,27	7,3	9,03
CA/C/CR	6,10	4,09	2,00	0,35	0,05	0,12	2,52	0,13	5,5	8,02
C/CR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Horizonte	V (%)	Al (%)	P Assimilável (mg kg ⁻¹)	Carbono orgânico (g kg ⁻¹)
A1	33,69	10,20	1,31	17,76
A2	18,38	13,00	0,71	12,03
AC	19,16	13,50	0,27	6,02
CA/C/CR	31,42	4,91	0,05	2,08
C/CR	-	-	-	-

DESCRIÇÃO DE PERFIL

Projeto: Dissertação Adão Pagani Junior

PERFIL N° - 09

DATA – 15/02/2022

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico leptofragmentário A moderado, textura franco arenosa, relevo forte ondulado, substrato granito

WRB: Leptic Regosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS

– Pelotas, Rio Grande do Sul, 359208,217m e 6506936,742m.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O

PERFIL- Descrito e coletado em trincheira ao lado da lavoura de pêssego.

ELEVAÇÃO – 119 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE- Não pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL – Fortemente Ondulado

RELEVO REGIONAL- Ondulado a forte ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subperenifólia

USO ATUAL – Mata nativa

DESCRITO E COLETADO POR – Adão Pagani Junior, Pablo Miguel, Mélory Maria Fernandes de Araújo e Giovana Millech Robe.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 09

A1	0-16 cm; cor úmida (7,5YR 2,5/2, úmida) e cor seca (7,5YR 4/2, seca); franco-arenosa; bloco subangulares e granular, grande e média respectivamente, moderado; ligeiramente dura; muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; clara e plana; raízes médias e finas respectivamente e comuns.
A2	16-28 cm; cor úmida (7,5YR 3/2, úmida) e cor seca (10YR 4/2, seca); franco-argilosa, pouco cascalhenta; blocos subangulares, média e grande, moderada; muito dura; muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; clara e plana; raízes finas e comuns.
AC	28-39 cm; cor úmida (10YR 3/3, úmida) e cor seca (2,5YR 5/3, seca); franca, cascalhenta; blocos subangulares e granular, média a grande e pequeno a média, moderada; muito dura; friável, plástica, ligeiramente pegajosa; clara e plana; raízes finas e poucas.
C	39-52 cm; cor úmida (7,5YR 3/4, úmida), cor seca (10YR 4/4, seca); franco-argilosa, cascalhenta; blocos subangulares, média a grande, forte; ligeiramente dura; friável, plástica, ligeiramente pegajosa; gradual e quebrada; raízes ausentes.
C/CR	52-78+ cm; cor úmida (2,5YR 4/6 e 10YR 5/6 úmida, respectivamente), cor seca (2,5YR 7/4, 10YR 3/1 seca, respectivamente); franco-argilosa e cascalhenta; ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.

Obs: No horizonte A2 há presença de pouco cascalho. No horizonte AC, C e C/CR há presença de cascalho. Presença de raízes médias, finas e comuns no horizonte A1. Presença de raízes finas e comuns no horizonte A2. Presença de raízes finas e poucas no horizonte AC. O horizonte CR apresenta saprólitos em avançado estado de intemperismo com o predomínio de cores vermelhas/laranjadas nas bordas indicando o início do estágio de intemperismo (oxidação). Os fragmentos saprólitos apresentam cobertura laminar de cor escura, possivelmente de material transportado dos horizontes superiores.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 09

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm
A1	0-16	0	20	80
A2	16-28	0	14	86
AC	28-39	1	43	56
C	39-52	3	55	42
C/CR	52-78+	7	75	18

Horizonte	Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)							Silte/Argila
	Areia m. grossa	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Areia m. fina	Silte	Argila	
A1	57,97	96,03	121,25	212,61	113,92	201,99	185,16	1,09
A2	64,92	77,11	112,78	208,65	72,39	263,67	198,69	1,33
AC	55,98	91,28	73,90	89,77	52,43	252,43	383,45	0,66
C	68,34	62,97	83,03	137,03	159,85	318,73	244,35	1,30
C/CR	13,95	99,28	121,88	166,01	96,88	223,10	314,81	0,71

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH7
A1	6,51	4,19	2,94	0,36	0,15	0,07	3,52	0,71	11,4	14,92
A2	5,43	4,14	1,41	0,29	0,09	0,07	1,86	0,58	9,4	11,26
AC	5,51	4,03	1,98	0,37	0,08	0,08	2,51	0,67	8,5	11,01
C	5,35	4,13	2,68	0,66	0,09	0,15	3,58	1,25	9,8	13,38
C/CR	5,4	3,93	3,23	0,54	0,07	0,09	3,93	1,87	9,4	13,33

Horizonte	V (%)	Al (%)	P Assimilável (mg kg ⁻¹)	Carbon Orgânico (g kg ⁻¹)
A1	23,59	16,78	0,6	12,14
A2	16,52	23,77	0,16	9,1
AC	22,80	21,07	0,38	7,38
C	26,76	25,88	0,11	7,13
C/CR	29,48	32,24	0,44	9,56

DESCRIÇÃO DE PERFIL

Projeto: Dissertação Adão Pagani Junior

PERFIL N° - 10

DATA – 18/04/2022

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário A moderado, textura franco-arenosa, relevo ondulado, substrato granito.

WRB: Dystric Leptosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS –

Pelotas, Rio Grande do Sul, 359374,279m e

6506964,303m.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE

OPERFIL- Descrito e coletado em topo inferior, barranco de estrada.

ELEVAÇÃO – 120 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE- Ligeiramente pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL – Ondulado

RELEVO REGIONAL- Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subperenifólia

USO ATUAL – Pomar de pessegueiro

DESCRITO E COLETADO POR – Adão Pagani Junior e Pablo Miguel.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 10

A	0-17 cm; cor úmida (10YR 4/3, úmida) e cor seca (7,5YR 4/2, seca); franco-arenosa; pouco cascalhenta; bloco subangulares, muito pequena, fraca; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; clara e plana.
Cr/A	17-25/56 cm; cor úmida (10YR 3/3, úmida) e cor seca (7,5YR 4/2, seca); franco-arenosa, pouco cascalhenta; blocos subangulares, muito pequena; fraca, dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; abrupta e irregular; raízes finas e abundantes.
R	25/56-112+ cm;

Obs: No horizonte A e Cr/A há presença de pouco cascalho. Presença de raízes finas e abundantes no horizonte Cr/A. Material de origem com cor 10YR 5/3 descrito no Hz R.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 10

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm
A	0-17	1	20	79
Cr/A	17-25/56	1	22	77
R	25/56-112+	-	-	-

Horizonte	Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)							Silte/Argila
	Areia m. grossa	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Areia m. fina	Silte	Argila	
A	43,78	83,73	136,21	172,33	93,68	284,36	183,12	1,72
Cr/A	28,47	143,65	144,15	135,45	68,47	358,74	128,23	2,95
R	-	-	-	-	-	-	-	-

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH7
A	5,41	4,22	4,45	0,77	0,15	0,14	5,51	0,13	9,7	15,21
Cr/A	5,61	3,55	4,35	0,64	0,11	0,17	5,27	0,8	12	17,27
R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Horizonte	V (%)	Al (%)	P Assimilável (mg kg ⁻¹)	Carbono Orgânico (g kg ⁻¹)
A	36,23	2,30	5,14	18,68
Cr/A	30,52	13,18	2,62	16,01
R	-	-	-	-

DESCRIÇÃO DE PERFIL

Projeto: Dissertação Adão Pagani Junior

PERFIL N° - 11

DATA – 15/02/2022

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico
A moderado, textura franco-argiloarenosa, relevo ondulado,
substrato granito.

WRB: Dystric Leptosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS –

Pelotas, Rio Grande do Sul, 359195,049m e
6507066,792m.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL - Descrito e coletado
em trincheira ao lado da lavoura de pêssego.

ELEVAÇÃO – 143 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA - Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e
Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE - Ligeiramente pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL – Ondulado

RELEVO REGIONAL - Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subperenifólia

USO ATUAL – Campo

DESCRITO E COLETADO POR – Adão Pagani Junior e Pablo Miguel.



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 11

A	0-13 cm; cor úmida (10YR 3/2, úmida) e cor seca (7,5YR 3/2, seca); franco-argiloarenosa; pouco cascalhenta; bloco subangulares e granular, muito pequena e média respectivamente, fraca e moderado, respectivamente; macia a ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; abrupta e plana; raízes finas e comuns.
AC	13-34 cm; cor úmida (7,5YR 3/2, úmida) e cor seca (10YR 3/2, seca); franco-argilosa; muito cascalhenta; blocos subangulares e granular, muito pequena, fraca; solta, muito friável a friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; abrupta e plana; raízes muito finas e comuns.
R	34-65+ cm;

Obs: No horizonte A há a presença de pouco cascalho. No horizonte AC há a presença de muito cascalho. Presença de raízes finas e comuns no horizonte A. Presença de raízes muito finas e comuns no horizonte AC. Material de origem com cor 10YR 8/4 descrito no Hz AC.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 11

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)		
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm
A	0-13	0	15	85
AC	13-34	2	56	42
R	34-65+	-	-	-

Horizonte	Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)							Silte/Argila
	Areia m. grossa	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Areia m. fina	Silte	Argila	
A	34,10	98,50	128,46	171,84	78,45	143,20	212,08	0,68
AC	143,13	85,96	51,09	51,85	32,27	275,65	355,98	0,77
R	-	-	-	-	-	-	-	-

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH7
A	5,41	4,22	6,40	0,78	0,40	0,22	7,80	0,13	12,4	20,20
AC	5,61	3,55	2,99	0,74	0,19	0,19	4,11	1,11	13,6	17,71
R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Horizonte	V (%)	Al (%)	P Assimilável (mg kg ⁻¹)	Carbono orgânico (g kg ⁻¹)
A	38,61	1,64	18,36	26,32
AC	23,21	21,26	4,42	12,39
R	-	-	-	-

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Tese Tiago Schuch Lemos Venzke

PERFIL N.º – 12

DATA – 28/12/2017

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico, A moderado, textura franco-arenosa; WRB: Leptic Regosol,

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul, 31°34'3.93"S e 52°28'48.44"O [359607 – 6506584 (489)].

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL – Descrito e coletado em trincheira aberta na mata, no terço superior da encosta, declive ondulado e mata nativa

ELEVAÇÃO – 91 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA – Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE – Ligeiramente pedregosa

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochosa

RELEVO LOCAL – Ondulado

RELEVO REGIONAL – Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subtropical

USO ATUAL – Mata

DESCRITO E COLETADO POR – Pablo Miguel, Luiz Fernando Spinelli Pinto, Tiago Schuch Lemos Venzke, Adão Pagani Junior, Maurício Silva de Oliveira

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 12

A	0-20 cm; cor úmida (10YR 3/2, úmida); franco-arenosa; blocos subangulares, pequena a média, fraca; ligeiramente dura; friável, plástica, ligeiramente pegajosa; clara e plana; raízes grossas e comuns
AC	20-38 cm; cor úmida (10YR 3/2, úmida); franco-arenosa; aspecto de maciça que se desfaz em blocos subangulares, média, fraca a moderada; ligeiramente dura; friável, plástica, ligeiramente pegajosa a pegajosa; clara e plana; raízes poucas e grossas
C	38-60/70; cor úmida (10YR 5,5/3, úmida); franco-arenosa, cascalhenta; dura; friável, clara e ondulada; raízes finas e poucas.
C/CR	60/70 – 85+ cm; cor úmida (7,5YR 6/4, úmida), e mosqueados (10YR 7/8 úmida); friável, firme, franco-arenosa, muito cascalhenta; clara e ondulada

OBSERVAÇÕES: ocorrência de matações esparsos na área.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 12

Horizonte		Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)				Silte/Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	
A	0 – 20	298	260	276	167	1,65
AC	20 – 38	191	331	305	174	1,75
C	38 – 60/70	228	370	276	126	2,19
CR	60/70 – 85+	343	245	268	144	1,86

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H	CTC pH7
A	4,91	4,08	3,78	0,88	0,21	0,05	4,92	1,06	7,06	13,04
AC	4,93	3,82	1,79	0,36	0,06	0,05	2,24	1,93	5,53	9,71
C	4,90	3,87	1,01	0,21	0,03	0,04	1,29	1,21	2,89	5,39
CR	4,96	3,82	1,19	0,34	0,04	0,04	1,61	1,40	2,55	5,56

Horizonte	V (%)	Al (%)	P (mg kg ⁻¹)	C Org. (g kg ⁻¹)
A	37,74	17,77	2,82	25,67
AC	23,11	46,27	0,98	10,14
C	24,01	48,29	0,85	5,39
CR	28,93	46,57	1,05	4,86

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Tese Tiago Schuch Lemos Venzke

PERFIL N° – 13

DATA – 28/12/2017

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico

típico, A moderado, textura franca, WRB: Leptic Regosol

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E

COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul,

31°34'8.72"S e 52°28'51.65"O [359487 – 6506424 (490)].

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL - Descrito e coletado em trincheira aberta na mata, terço inferior da encosta, declive ondulado e uso atual mata nativa.

ELEVAÇÃO – 51 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA – Suíte Pinheiro Machado, Éon Proterozóico, Era Neoproterozóico e Período Ediacariano

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE – Não pedregoso

ROCHOSIDADE – Ligeiramente rochoso

RELEVO LOCAL - Ondulado

RELEVO REGIONAL - Ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Moderadamente drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subtropical

USO ATUAL – Mata nativa

DESCRITO E COLETADO POR – Pablo Miguel, Luiz Fernando Spinelli Pinto, Tiago Schuch Lemos Venzke, Adão Pagani Junior, Maurício Silva de Oliveira

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 13

A	0-22 cm; cor úmida (10YR 3/2, úmida); franca; aspecto maciça em blocos subangulares, pequena, fraca; ligeiramente dura; friável, firme; clara e plana; raízes médias e finas respectivamente e comuns.
AC	22-42 cm; cor úmida (10YR 4/2, úmida), mosqueado (5YR 4/6) resultante de matéria orgânica carbonizada (10YR 3/1); aspecto de maciça que se desfaz em blocos subangulares, pequena e média, friável, firme; clara e plana; raízes finas e comuns.
C1	42-65/70; cor úmida (10YR 5/3, úmida), mosqueado (10YR 5/8) pequeno e abundante; firme, friável; clara e ondulada; raízes finas e poucas
C2	65/70-100+; cor úmida (10YR 6/1, úmida), cor seca (10YR 6/2, seca), mosqueado (10YR 5/8, amarelo) pouco, médio a grande, abundante e distinto; firme e friável.

OBSERVAÇÕES:

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 13

Horizonte		Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)				Silte/Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	
A	0 – 22	205	226	371	198	1,87
AC	22 – 42	284	228	364	124	2,94
C1	42 – 65/70	312	245	339	105	3,23
C2	65/70 – 100+	290	262	344	104	3,31

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al	H + Al	CTC pH 7
A	5,18	4,18	5,92	1,03	0,09	0,08	7,12	0,77	6,11	14,01
AC	5,55	4,23	3,75	0,45	0,03	0,07	4,30	0,53	3,13	7,96
C1	5,55	4,14	3,13	0,69	0,03	0,06	3,90	0,48	1,47	5,86
C2	5,55	4,01	3,21	0,85	0,02	0,06	4,15	0,63	0,89	5,68

Horizonte	V (%)	Al (%)	P (mg kg ⁻¹)	C Org. (g kg ⁻¹)
A	50,85	9,79	2,03	16,31
AC	54,01	11,01	1,11	6,35
C1	66,58	11,03	1,71	2,68
C2	73,18	13,14	1,44	1,95

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Disciplina de Levantamento do Solo PPG MACSA

PERFIL N° - 14

DATA – 07/12/2023

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E

COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul, (-31.5747,-52.4849).

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O

PERFIL – Descrito e coletado em trincheira aberta no campo, declive ondulado (terço médio) e próximo à lavoura de soja.

ELEVAÇÃO – 82 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA – Suíte Pinheiro Machado

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Ondulado

RELEVO REGIONAL – Suave ondulado a ondulado

EROSÃO – Laminar

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subperenifólia

USO ATUAL – Barranco de estrada

DESCRITO E COLETADO POR – Alinne Santos da Silva, Pablo Miguel, Rafael Junqueira Moro e Tainara Vaz de Melo



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 14

A	0-22 cm; bruno escuro (10YR 3/3, úmida) e bruno (7,5YR 4,5/4, seca); franco-argiloarenosa; blocos subangulares pequena a média fraca a moderada e granular pequena a média moderada; dura, muito friável; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
CrA	22-41 cm; bruno forte (7,5YR 5/6, seca); muito dura; transição plana e gradual.
Cr1	41-71 cm; bruno (7,5YR 4/2, úmida) e amarelo avermelhado (7,5YR 6/8, seca); dura; transição plana e gradual.
Cr2	71- 100+; amarelo avermelhado (7,5YR 7/6, seca); ligeiramente dura.

OBSERVAÇÕES: Descrito em barranco de estrada, próximo à lavoura de soja. Pouco cascalhenta.

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 14

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)			Silte/Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm	Areia	Silte	Argila	
A	0-22	40,96	59,04	100	508	269	223	1,2
CrA	22-41	40,17	59,83	100	473	265	263	1,0
Cr1	41-71	53,94	46,06	100	605	287	108	2,6
Cr2	71+	36,67	63,33	100	550	339	111	3,0

Horizonte		Frações da Areia (g kg ⁻¹)				
Símbolo	Profundidade (cm)	Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina
A	0-22	175	87	85	115	45
CrA	22-41	152	122	80	77	40
Cr1	41-71	187	167	102	92	55
Cr2	71+	182	142	92	97	35

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	Al ³⁺	H + Al	CTC pH 7,0
A	5,17	3,93	3,0	1,1	0,34	0,11	4,6	2,3	3,4	8,0
CrA	5,36	4,03	2,8	1,1	0,1	0,10	4,1	4,0	2,7	6,8
Cr1	5,63	3,94	2,4	1,5	0,05	0,13	4,1	2,5	0,6	4,7
Cr2	5,36	3,98	2,3	1,1	0,05	0,11	3,6	3,0	0,7	4,3

Horizonte	V (%)	Al (%)	Na (%)	T argila (cmol _c kg ⁻¹)	P Assimilável (mg kg ⁻¹)	Carbono Org. (g kg ⁻¹)
A	57	33	1,41	35,8		1,20
CrA	60	49	1,41	25,8		0,56
Cr1	87	37	2,87	43,5		0,16
Cr2	83	45	2,63	38,7		0,16

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Disciplina de Levantamento do Solo PPG MACSA

PERFIL N° - 15

DATA – 08/02/2024

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO LITÓLICO

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul, 31°32'37,84"S e 52°30'12,02"O.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL – Descrito e coletado em trincheira aberta no campo, declive ondulado (terço médio).

ELEVAÇÃO – 75 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA – Suíte Pinheiro Machado

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Ondulado

RELEVO REGIONAL – Ondulado

EROSÃO – Ligeira/laminar

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Campo subtropical

USO ATUAL – Barranco de estrada com vegetação nativa

DESCRITO E COLETADO POR – Adão Pagani Junior, Tainara Vaz de Melo, Verônica Lemos Vargas, Rafael Junqueira Moro, Paulo Anselmi Duarte da Silva e Maurício Silva de Oliveira



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 15

A	0-25 cm; cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida) e bruno acinzentado escuro (10YR 4/2, seca); franco-arenosa; blocos subangulares pequena fraca; ligeiramente dura; muito friável; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
A/CR	25-30/35 cm; cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida), com mosqueados bruno muito claro (10YR 8/3, úmida) e bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, seca), mosqueados amarelo brunado (10YR 6/6, seca); franco-arenosa; muito cascalhenta; grãos simples pequena fraca; ligeiramente dura; friável; não plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e abrupta.
C/CR	30/35-84 cm; bruno muito claro (10YR 8/2, úmida), variegado bruno acinzentado escuro (10YR 4/2, úmida) e amarelo (10YR 7/6, seca), variegado bruno (10YR 5/3, seca); transição plana e clara.
CR	84-130+ cm; bruno muito claro (10YR 8/2, úmida); amarelo (10YR 7/8, úmida amassada).

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 15

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)			Silte/Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm	Areia	Silte	Argila	
A	0-25	13	86	100	576	290	133	2,1
A/CR	20-30/35	40	59	100	576	285	138	2,0
C/CR	30/35-84	35	64	100	609	256	133	1,9
CR	84-130+	-	-	-	-	-	-	-

Horizonte		Frações da Areia g.kg ⁻¹				
Símbolo	Profundidade (cm)	Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina
A	0-25	122	142	149	99	63
A/CR	20-30/35	264	109	94	66	41
C/CR	30/35-84	308	124	85	62	28
CR	84-130+	-	-	-	-	-

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	Al ³⁺	H + Al	CTC pH7
A	5,9	4,7	6,9	1,8	0,6	0,1	9,4	0,3	2,5	11,9
A/CR	5,1	3,9	4,3	1,3	0,2	0,1	5,9	2,9	4,4	10,3
C/CR	5,1	3,9	2,5	0,9	0,1	0,1	3,6	4,5	2,6	6,2

Horizonte	V (%)	Al (%)	Na (%)	T argila (cmol _c kg ⁻¹)	P Assimilável (mg kg ⁻¹)	Carbono Org. (g kg ⁻¹)
A	79	3	0,5	89,4		1,60
A/CR	57	33	0,9	74,5		1,20
C/CR	58	55	2,2	46,3		0,48
CR	-	-	-	-	-	-

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Disciplina de Levantamento do Solo PPG MACSA

PERFIL N° - 16

DATA – 08/02/2024

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E

COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul, 31°32'46"S e 52°31'19"O.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O

PERFIL – Descrito e coletado em trincheira aberta no campo, declive ondulado (terço médio).

ELEVAÇÃO – 139 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA – Suíte Pinheiro Machado

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE – Não pedregoso

ROCHOSIDADE – Não rochoso

RELEVO LOCAL – Ondulado

RELEVO REGIONAL – Ondulado

EROSÃO – Ligeira/laminar

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Campo subtropical

USO ATUAL – Barranco de estrada e próximo à lavoura de soja

DESCRITO E COLETADO POR – Adão Pagani Junior, Tainara Vaz de Melo, Verônica Lemos Vargas, Rafael Junqueira Moro, Paulo Anselmi Duarte da Silva e Maurício Silva de Oliveira



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 16

A1	0-28 cm; bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmida) e bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, seca); franco-arenosa; cascalhenta; blocos subangulares pequena fraca; ligeiramente dura; friável; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
A2	28-43 cm; bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmida) e cinza muito escuro (10YR 3/1, seca); franco-arenosa; muito cascalhenta; grãos simples pequena fraca; ligeiramente dura; friável; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
A3	43-70 cm; bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmida) e preto (7,5YR 2,5/1, seca); franco-arenosa; cascalhenta; blocos subangulares média fraca; ligeiramente dura; friável; não plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e abrupta.
A/CR	70-90/100 cm; bruno muito claro (10YR 8/4, úmida), variegado cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida) e bruno escuro (7,5YR 3/2, seca); franco-arenosa; muito cascalhenta; macia; muito friável; não plástica e não pegajosa; transição ondulada e abrupta.
C/CR	90/100-190+ cm; amarelo brunado (10YR 6/8, úmida), variegados bruno muito claro (10YR 8/4, úmida) e preto (10YR 2/1, úmida) e preto (7,5YR 2,5/1, seca).

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 16

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)			Silte/Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia	Silte	Argila	
A1	0-28	29,47	70,53	100	734	178	88	2,0
A2	28-43	45,01	54,99	100	602	250	149	1,6
A3	43-70	33,53	66,47	100	660	219	121	1,8
A/CR	70-90/100	18,39	81,61	100	726	170	104	1,6
C/CR	90/100-190+	20,04	79,96	100	588	213	200	1,0

Horizonte		Frações da Areia (g kg ⁻¹)				
Símbolo	Profundidade (cm)	Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina
A1	0-28	487	85	72	56	32
A2	28-43	185	87	153	119	55
A3	43-70	262	119	137	102	38
A/CR	70-90/100	312	181	113	74	43
C/CR	90/100-190+	175	110	134	110	56

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	Al ³⁺	H + Al	CTC pH7
A1	5,7	4,3	5,2	1,1	0,42	0,03	6,8	0,7	2,4	9,2
A2	5,6	4,2	6,7	0,8	0,27	0,05	7,8	0,8	2,4	10,2
A3	5,4	3,9	6,6	0,9	0,25	0,06	7,8	2,3	2,1	9,9
A/CR	5,7	4,0	4,7	0,8	0,16	0,08	5,7	2,2	1,9	7,6
C/CR	5,6	3,9	3,6	1,4	0,08	0,12	5,2	2,5	2,8	8,0

Horizonte	V (%)	Al (%)	Na (%)	T argila (cmol _c kg ⁻¹)	P Assimilável (mg kg ⁻¹)	Carbono Org. (g kg ⁻¹)
A1	73	9	0,33	104,5		1,28
A2	76	9	0,47	68,4		1,12
A3	78	22	0,61	81,8		0,80
A/CR	75	27	1,09	73,0		0,56
C/CR	65	32	1,47	40,0		0,32

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO: Disciplina de Levantamento do Solo PPG MACSA

PERFIL N° - 17

DATA – 08/02/2024

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO REGOLÍTICO

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E

COORDENADAS – Pelotas, Rio Grande do Sul, 31°32'37"S e 52°32'56"O.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL – Descrito e coletado em trincheira aberta no campo, declive ondulado (terço médio).

ELEVAÇÃO – 136 metros

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suíte Pinheiro Machado

CRONOLOGIA – Suíte Pinheiro Machado

MATERIAL ORIGINÁRIO – Granito

PEDREGOSIDADE – Não pedregoso

ROCHOSIDADE – Não rochoso

RELEVO LOCAL – Ondulado

RELEVO REGIONAL – Ondulado

EROSÃO – Ligeira/laminar

DRENAGEM – Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Campo subtropical

USO ATUAL – Barranco de estrada próximo à cultura perene (pessegueiro)

DESCRITO E COLETADO POR – Adão Pagani Junior, Tainara Vaz de Melo, Verônica Lemos Vargas, Rafael Junqueira Moro, Paulo Anselmi Duarte da Silva e Maurício Silva de Oliveira



DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – Perfil 17

A	0-20 cm; bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmida) e bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, seca); franco-arenosa; blocos subangulares pequena fraca; ligeiramente dura; friável; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
AC/CR	20-30/45 cm; bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmida), variegado cinza (10YR 6/1, úmida) e bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, seca); franco-arenosa; cascalhenta; blocos subangulares muito pequena a pequena fraca; não plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
CR/C	30/45-80+ cm; bruno amarelado (10YR 5/4, úmida), variegados amarelo (10YR 8/6, úmida) e bruno acinzentado escuro (10YR 4/2, úmida) e bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, seca); muito cascalhenta.

OBSERVAÇÕES: Presença de uma “língua” de textura argilosa no horizonte CR/C de cor preto (10YR 2/1, úmida)

CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 17

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)			Silte/Argila
Símbolo	Prof. (cm)	Calhaus >20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia	Silte	Argila	
A	0-20	49	50	100	664	208	128	1,6
AC/CR	20-30/45	27	72	100	611	225	162	1,3
CR/C	30/45-80+	25	74	100	617	216	165	1,3

Horizonte		Frações da Areia (g kg ⁻¹)				
Símbolo	Profundidade (cm)	Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina
A	0-20	248	134	116	88	75
AC/CR	20-30/45	205	157	111	76	61
CR/C	30/45-80+	243	168	100	62	42

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)							
	Água	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	Al ³⁺	H + Al	CTC pH7
A	5,9	4,3	6,1	1,5	0,1	0,04	7,8	0,6	1,4	9,2
AC/CR	5,8	4,0	7,2	1,7	0,1	0,10	9,1	2,5	2,9	12,0
CR/C	5,6	3,7	5,7	2,1	0,1	0,30	8,2	4,8	2,4	10,6

Horizonte	V (%)	Al (%)	Na (%)	T argila (cmol _c kg ⁻¹)	P Assimilável (mg kg ⁻¹)	Carbono Orgânico (g kg ⁻¹)
A	84	7	0,43	71,8	-	0,96
AC/CR	75	21	0,83	73,9	-	0,56
CR/C	77	36	2,83	63,9	-	0,48