



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

MARCELLO AUGUSTO DIAS DA CUNHA

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE
PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM SOLOS ARENOSOS**

Presidente Prudente - SP
2026



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

MARCELLO AUGUSTO DIAS DA CUNHA

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE
PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM SOLOS ARENOSOS**

Tese apresentada Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor – Área de concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Edeimar Moro

Presidente Prudente - SP
2026

630
C972i

Cunha, Marcello Augusto Dias da Cunha.
Indicadores de qualidade do solo em sistemas
de produção agrícola em solos arenosos / Marcello
Augusto Dias da Cunha. – Presidente Prudente,
2026.
175f.: il.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade do
Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP,
2026.

Bibliografia.

Orientador: Edemar Moro.

1. Solos arenosos. 2. Qualidade do solo. 3.
Biomassa microbiana. 4. Integração lavoura-pecuária. I.
Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM SOLOS ARENOSOS"

AUTOR(A): MARCELLO AUGUSTO DIAS DA CUNHA

ORIENTADOR(A): Dr. EDEMAR MORO

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR(A) em AGRONOMIA - Área de Concentração PRODUÇÃO VEGETAL, pela Comissão Examinadora:

Dr. EDEMAR MORO (Orientador)

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Dr. CARLOS SÉRGIO TIRITAN

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Dr. MARCELO RAPHAEL VOLF

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Dr. GILBERTO GONÇALVES LEITE

UnB - Universidade de Brasília (DF)

Dr. RODRIGO ARROYO GARCIA

Embrapa Agropecuária Oeste / Dourados (MS)

Data da realização: Presidente Prudente, 31 de março de 2026.

Central de Assinaturas Eletrônicas

Sobre o documento

Assunto: Documento eletrônico
Status do documento: Concluído
Data de criação do documento: 07/04/2026 10:29
Fuso horário: (UTC-03:00) Brasília
Número de assinaturas: 5
Solicitante: KEID RIBEIRO KRUGER (#6481698)

Signatários do documento

CARLOS SÉRGIO TIRITAN (COORDENADOR DE CURSO)

tiritan@unoeste.br
Recebido em 07/04/2026 10:29
Assinado em 07/04/2026 14:29
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 177.131.33.2
ID da assinatura: 6535364

EDEMAR MORO (PROFESSOR)

edemar@unoeste.br
Recebido em 07/04/2026 10:29
Assinado em 07/04/2026 10:32
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 187.73.202.15
ID da assinatura: 6535363

MARCELO RAPHAEL VOLF (PROFESSOR)

marcelovolf@unoeste.br
Recebido em 07/04/2026 10:29
Assinado em 07/04/2026 11:52
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 200.34.219.176
ID da assinatura: 6535365

GILBERTO GONÇALVES LEITE (SIGNATÁRIO EXTERNO)

gleite@unb.br
Recebido em 07/04/2026 10:29
Assinado em 07/04/2026 10:31
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 2804:18:110c:faa6:18a3:ef3b:5545:1b77
ID da assinatura: 6535367

RODRIGO ARROYO GARCIA (SIGNATÁRIO EXTERNO)

rodrigo.garcia@embrapa.br
Recebido em 07/04/2026 10:29
Assinado em 07/04/2026 21:19
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 2804:d59:adf8:af00:b93a:6b8d:469a:5a47
ID da assinatura: 6535366

URL do documento: <https://www.unoeste.br/ca/e02e3908>

Assinatura digital do documento: b44142e72a4afd4d1503a3b5ae0123200c90bd7034f308cf15ed4a05d78804ad

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista

Mantida pela EPEC - Empresa Prudentina de Educação e Cultura SA

Utilize o QRCode abaixo para conferir a autenticidade deste documento:



DEDICATÓRIA

In memoriam de Maria Flávia Dias da Cunha, minha mãe, cuja presença permanece como luz perene, fundamento silencioso de amor vital. A ela, que nunca desistiu de apoiar minha voluntariedade, que me ensinou a lutar o bom combate e que, com sabedoria serena, afirmava: "O que é seu, por direito divino, sempre virá". Seu colo quentinho — afeto que acolhe, força que sustenta — segue sendo o abrigo e o impulso que atravessam esta conquista. Dedico-lhe, com reverência e profundo reconhecimento, este trabalho que também é fruto da coragem que ela semeou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Grande Arquiteto do Universo, que é Deus, cuja presença se manifesta como música eterna, sustentada por quatro acordes que, multiplicados por três, ampliam e se traduzem na "generosidade" necessária para cada etapa desta jornada acadêmica e pessoal.

Expresso minha sincera gratidão ao grupo dos doze que, assim como os apóstolos, permaneceram firmes, fluidos e essenciais ao longo deste percurso de crescimento: Edegar Moro, Adriana Lima Moro, Marcelo Alves, Carlos Sérgio Tiritan, Alexandrius de Moraes Barbosa, Fábio Fernando Araújo, Carlos Henrique dos Santos, Lidiane Espinhosa de Sousa, Élica Moreira de Lima, Édson Aparecido da Silva, Rosa Maria Rodrigues da Silva e Fábio Pedro Silva Batista. A cada um, registro meu reconhecimento pela presença, incentivo e apoio constantes.

Estendo meus agradecimentos, em três notas de especial consideração, aos Professores Fábio Rafael Echer e Edgard Henrique Costa Silva, bem como à colaboradora Keid R. Krueger, cujas contribuições fortaleceram de maneira estratégica esta tese.

Ao amigo e hoje engenheiro agrônomo Anderson Fagundes Oliveira, ao aluno Lucas Bezerra, integrante do grupo de pesquisas Fito-Cana da Unoeste, e à colega hoje Mestre em Meio Ambiente, Júlia Cardoso Silva, deixo meu apreço sincero pelo apoio fundamental na etapa mais exigente das análises laboratoriais.

Às técnicas dos Laboratórios da Unoeste Luciana Muchiutti P. Assumpção e Joicelete Lima Martinez, a minha mais profunda gratidão pelo apoio e empatia ao dedicarem seus tempos preciosos para garantirem que minhas análises fossem detalhistas e atendessem ao alto padrão desejado.

À minha família — José Maria, Ana Vitória e Frederico — manifesto profunda gratidão transcendental. Mesmo à distância, sustentaram a harmonia necessária para que eu pudesse avançar com serenidade e propósito. Somos como doze, mas juntos somos quatro, e ao final, eternamente seremos cinco: José, o pai; Maria, a mãe (*in memoriam*); Marcello, Frederico e Ana, os filhos. Aos quatro, dedico parte essencial desta conquista.

Agradeço também aos três primeiros que acreditaram na minha capacidade produtiva dentro do universo ilimitado e inquietante da pesquisa científica:

Dr. Gilberto Gonçalves Leite, Dr. José Mauro da Silva Diogo e Dr. Sérgio Lúcio Salomon Cabral Filho. E, quando se tornaram quatro, incluo com especial apreço a acolhedora e bondosa Dra. Márcia de Aguiar Ferreira, presença que acrescentou equilíbrio e companheirismo a esta jornada.

A todos aqueles que representam a Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), agradeço pela oportunidade de formação, pelo ambiente acadêmico que promove a pesquisa e pela confiança depositada no desenvolvimento deste trabalho. Às coordenações que tive o privilégio de acompanhar, aos docentes, aos demais técnicos e aos colegas do Programa, registro meu reconhecimento pelo apoio institucional, científico e humano que tornaram possível a realização desta tese.

Assim, no compasso que une fé, afeto e razão, concluo estes agradecimentos reafirmando que cada número, cada ciclo e cada pessoa aqui mencionados compõem a arquitetura simbólica que sustentou esta jornada.

Meus agradecimentos com profundo respeito e apreço sincero, "em treze".
Muito obrigado.

"...minha casa não é minha e nem é meu este lugar, estou só e não resisto, muito tenho para falar. Solto a voz nas estradas, já não quero parar, meu caminho é de pedra, como posso sonhar?... (Milton Nascimento)"

RESUMO

Indicadores de qualidade do solo em sistemas de produção agrícola em solos arenosos

Em solos arenosos tropicais do Oeste Paulista, a qualidade do solo responde fortemente ao tipo de uso e ao nível de revolvimento. Este estudo comparou cinco sistemas de manejo do solo: Pasto, PastoLP, CulturalLP, Pivô e Floresta, para identificar indicadores sensíveis de sustentabilidade. A estratégia integrou frações químicas da matéria orgânica do solo (MOS) e indicadores microbiológicos e enzimáticos. O objetivo foi discriminar manejos e apoiar o monitoramento e a tomada de decisão. O estudo foi conduzido na Fazenda Ybyeté Porã, em Rancharia-SP, em solos arenosos, predominantemente Argissolos e Latossolos, no período de maio de 2022 a maio de 2023. A MOS foi avaliada por fracionamento químico em ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HU), além de indicadores biológicos: respiração do solo, carbono da biomassa microbiana (CBM), qCO_2 e atividades enzimáticas (FDA, desidrogenase, β -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase), com comparação entre manejos e profundidades (0–10 e 10–20 cm) e análise estatística (ANOVA) e integrada dos atributos. Nas conclusões, em 2022 o AF (fração lábil) foi o atributo químico mais sensível, variando de 0,87 a 4,30 $g\ kg^{-1}$, com maiores teores em Pasto (4,30) e Pivô (3,89). O AH (fração mais estável) foi maior em sistemas com menor revolvimento, com destaque para Pasto (1,75 $g\ kg^{-1}$) e Floresta (1,15 $g\ kg^{-1}$), e menor no PastoLP (0,55 $g\ kg^{-1}$). A HU (fração mais recalcitrante e indicadora de sequestro de carbono a longo prazo) evidenciou melhor desempenho de sistemas com menor revolvimento do solo: em 2022, Pasto apresentou o maior teor em 0–10 cm (8,04 $g\ kg^{-1}$) e manteve estabilidade vertical em 2023 (5,69 $g\ kg^{-1}$ na superfície e 5,62 $g\ kg^{-1}$ em profundidade); já CulturalLP apresentou menor estabilização, com queda para 2,73 $g\ kg^{-1}$ em 10–20 cm, sugerindo efeito do revolvimento do solo. Os indicadores biológicos reforçaram esse padrão: em 2022, a respiração do solo foi máxima no Pasto (0,12 $mg\ CO_2\ hora^{-1}$) e mínima no CulturalLP (0,026 $mg\ CO_2\ hora^{-1}$). Em 2023, o CBM foi maior em Pasto (181,76 $mg\ C\ g^{-1}\ solo$), seguido de Floresta (172,93 $mg\ C\ g^{-1}$), enquanto os menores valores

ocorreram em Pivô (87,47 mg C g⁻¹) e CulturalLP (84,56 mg C g⁻¹). Em 2022, a arilsulfatase foi consistentemente superior no Pasto (230,8 µg PNP g⁻¹ solo h⁻¹), e o Pivô apresentou a menor atividade (43 µg PNP g⁻¹ solo h⁻¹). Em síntese, houve correlação positiva entre manejos conservacionistas (menor movimentação do solo), maiores teores de carbono nas frações humificadas e maior atividade biológica. O Pasto emergiu como o melhor tratamento na promoção da qualidade do solo, enquanto PastoLP e CulturalLP apresentaram-se como alternativas intermediárias e promissoras para solos arenosos do Oeste Paulista. A combinação de fracionamento químico da MOS (AF, AH e HU) com indicadores enzimáticos e microbianos constitui um ferramental robusto para monitoramento e suporte à decisão em sistemas produtivos.

Palavras-chave: substâncias húmicas; atividades enzimáticas; biomassa microbiana; integração lavoura-pecuária; solos arenosos; saúde do solo.

ABSTRACT

Soil quality indicators in agricultural production systems on sandy soils

In tropical sandy soils of Western São Paulo State, soil quality responds strongly to land use and the degree of soil disturbance. This study compared five soil management systems: Pasture, PastureILP, CropILP, Pivot irrigation, and Forest, aiming to identify sensitive sustainability indicators. The approach integrated chemical fractions of soil organic matter (SOM) with microbiological and enzymatic indicators. The objective was to discriminate among management systems and support monitoring and decision-making. The study was conducted at Fazenda Ybyeté Porã, in Rancharia, São Paulo State, Brazil, on sandy soils, predominantly Ultisols and Oxisols, from May 2022 to May 2023. SOM was assessed by chemical fractionation into fulvic acid (FA), humic acid (HA), and humin (HU), in addition to biological indicators: soil respiration, microbial biomass carbon (MBC), qCO_2 , and enzymatic activities (FDA, dehydrogenase, β -glucosidase, arylsulfatase, and phosphatase). Management systems and soil depths (0–10 and 10–20 cm) were compared using ANOVA and integrated multivariate analyses of the attributes. In the conclusions, in 2022 FA (labile fraction) was the most sensitive chemical attribute, ranging from 0,87 to 4,30 g kg⁻¹, with the highest values under Pasture (4,30) and Pivot irrigation (3,89). HA (more stable fraction) was higher under less disturbed systems, particularly Pasture (1,75 g kg⁻¹) and Forest (1,15 g kg⁻¹), and lowest under PastureILP (0,55 g kg⁻¹). HU (most recalcitrant fraction and an indicator of long-term carbon sequestration) highlighted better performance of systems with lower soil disturbance: in 2022, Pasture showed the highest HU at 0–10 cm (8,04 g kg⁻¹) and maintained vertical stability in 2023 (5,69 g kg⁻¹ at the surface and 5,62 g kg⁻¹ at depth); in contrast, CropILP exhibited reduced stabilization, dropping to 2,73 g kg⁻¹ at 10–20 cm, suggesting an effect of soil disturbance. Biological indicators reinforced this pattern: in 2022, soil respiration was highest under Pasture (0,12 mg CO₂ hora⁻¹) and lowest under CropILP (0,026 mg CO₂ hora⁻¹). In 2023, MBC was highest under Pasture (181,76 mg C g⁻¹ soil), followed by Forest (172,93 mg C g⁻¹), whereas the lowest values occurred under

Pivot irrigation ($87,47 \text{ mg C g}^{-1}$) and CropILP ($84,56 \text{ mg C g}^{-1}$). In 2022, arylsulfatase activity was consistently highest under Pasture ($230,8 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$), while Pivot irrigation showed the lowest activity ($43 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$). Overall, a positive association was observed between conservation-oriented management (reduced soil disturbance), higher carbon contents in humified fractions, and greater biological activity. Pasture emerged as the best treatment for promoting soil quality, while PastureILP and CropILP were intermediate and promising alternatives for sandy soils in Western São Paulo State. The combined use of SOM chemical fractionation (FA, HA, and HU) with enzymatic and microbial indicators provides a robust toolkit for monitoring and decision support in production systems.

Keywords: humic substances; enzymatic activities; microbial biomass; integrated crop–livestock systems; sandy soils; soil health.

LISTA DE FIGURAS

1	Gráfico da Atividade da fração Ácido Fúlvico (AF) da matéria orgânica em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.	78
2	Gráfico da Atividade da fração Ácido Húmico (AH) da MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.	80
3	Gráfico da Atividade da respiração do solo em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.	87
4	Gráfico da Atividade do Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.	89
5	Gráfico da Atividade da Desidrogenase (DSID) em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	92
6	Gráfico da Atividade da Arilsulfatase (ARILS) em cinco diferentes usos de terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	94
7	Gráfico da Atividade da Fluoresceína Diacetato (FDA) em cinco diferentes usos de terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	96
8	Gráfico da Atividade da Glicosidase (GLI) em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	98
9	Gráfico da Atividade da Fosfatase (FOS) em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	102
10	Gráfico da Atividade da Fração Ácido Fúlvico (AF) da MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.	105
11	Gráfico da Atividade da Fração Ácido Húmico (AH) da MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.	107

12	Gráfico da Atividade da Fração Humina (HU) da MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	109
13	Gráfico da Atividade Enzimática do Carbono da Biomassa Microbiana na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.	111
14	Gráfico da Atividade Enzimática da Desidrogenase (DNASE) na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	114
15	Gráfico da Atividade Enzimática da FDA na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	116
16	Gráfico da Atividade Enzimática da Glicosidase (GLI) na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	119
17	Gráfico da Atividade Enzimática da Arilsulfatase na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	121
18	Gráfico da Atividade Enzimática da Fosfatase na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	123
19	Análise de Componentes Principais (PCA) dos parâmetros analisados em 2022	126
20	Gráfico de Barras Divergentes apresentando correlações positivas e negativas dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.	128
21	Análise de Componentes Principais (PCA) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.	132
22	Gráfico de Barras Divergentes apresentando correlações positivas e negativas dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.	134

23	Análise de Componentes Principais (PCA) das estimativas de Eficiências do Uso de Água Disponível (EUAD) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.	137
24	Gráficos de Barras Divergentes das estimativas de Eficiências do Uso de Água Disponível (EUAD) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.	139
25	Análise de Componentes Principais (PCA) das estimativas de Eficiências do Uso de Água Disponível (EUAD) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.	142
26	Gráficos de Barras Divergentes das estimativas de Eficiências do Uso de Água Disponível (EUAD) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.	144

LISTA DE TABELAS

1	Resumo climatológico de maio de 2021 a abril de 2023 em Rancharia/SP.	58
2	Análise do solo. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.	61
3	Parâmetros físicos, microbiológicos do solo e EUAD. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.	70
4	Valores de testes de hipóteses ($F < Pr$) para cada parâmetro da fração química da matéria orgânica avaliado em cada profundidade. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	73
5	Variação quantitativa ($g\ kg^{-1}$) da Fração Humina (HU) em duas profundidades (0-10 cm e 10 a 20 cm) em cinco diferentes usos da terra no ano de 2022	81
6	Variação quantitativa ($g\ kg^{-1}$) da Fração Humina (HU) em duas profundidades (0-10 cm e 10 a 20 cm) em cinco diferentes usos da terra no ano de 2023.	83
7	Valores de testes de hipóteses ($F < Pr$) para cada parâmetro microbiológico avaliado. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	85
8	Valores de testes de hipóteses ($F < Pr$) para cada parâmetro microbiológico e frações químicas da matéria orgânica avaliados em conjunto. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	Contextualização econômica e estratégica da integração lavoura-pecuária (ILP)	24
2.2	O sistema de manejo dos solos é realmente importante?	26
2.3	Sistemas integrados de manejo e produção	26
2.3.1	A palhada em sistema de integração lavoura pecuária	27
2.4	Sistemas de Integração Lavoura Pecuária (SILP) - Aspectos econômicos	31
2.5	Matéria orgânica do solo (MOS)	33
2.6	Fracionamento da matéria orgânica do solo	34
2.6.1	Fração ácido fúlvico da MOS	35
2.6.2	Fração ácido húmico da MOS	36
2.6.3	Fração humina da MOS	38
2.7	Aspectos microbiológicos do solo e sua importância	39
2.7.1	Qualidade do solo	39
2.8	Indicadores de Qualidade do Solo (IQS)	39
2.8.1	Indicadores Físicos de Qualidade do Solo (IFQS)	39
2.8.2	Indicadores Biológicos de Qualidade do Solo (IBQS)	42
2.8.2.1	Biomassa microbiana do solo (BMS)	42
2.8.2.2	Carbono da biomassa microbiana (CBM)	43
2.8.2.3	Nitrogênio da biomassa microbiana (NBM)	44
2.8.2.4	Atividade do diacetato de fluoresceína (FDA)	45
2.8.2.5	Atividade de desidrogenase (DNASE)	46
2.8.2.6	Atividade da beta glicosidase (β glicosidase - GLI)	47
2.8.2.7	Atividade da arilsulfatase (ARIL)	49
2.8.2.8	Atividade da fosfatase ácida (FOS)	51
2.8.2.9	Respiração da biomassa microbiana do solo (RBMS)	52
2.8.2.10	Quociente metabólico do solo (qCO_2)	54
3	JUSTIFICATIVA	55

4	HIPÓTESES	56
5	OBJETIVOS	57
5.1	Objetivo Geral	57
5.2	Objetivos Específicos	57
6	METODOLOGIA E ANÁLISE DE DADOS	58
6.1	Área De Estudo	58
6.2	Sistemas de Manejo	59
6.2.1	Pasto	59
6.2.2	PastolLP	59
6.2.3	CulturalLP	60
6.2.4	Pivô	60
6.2.5	Floresta	60
6.3	Etapas de trabalho	61
6.3.1	Reconhecimento prévio da área de estudo	62
6.3.2	Trabalhos de campo	62
6.3.3	Trabalhos de Laboratório	63
6.3.3.1	Fracionamento Químico da Matéria Orgânica do Solo (MOS)	63
6.3.3.2	Análises Microbiológicas do Solo	64
6.3.3.3	Análise da respiração do solo	64
6.3.3.4	Análise do carbono e nitrogênio da biomassa microbiana	65
6.3.3.5	Quociente metabólico (qCO ₂)	67
6.3.3.6	Análise da atividade da enzima desidrogenase	67
6.3.3.7	Análise da atividade das enzimas fosfatases ácidas e alcalinas	67
6.3.3.8	Análise da atividade da enzima da β -glicosidase	68
6.3.3.9	Análise da atividade da enzima arilsulfatase	68
6.3.3.10	Método de hidrólise do diacetato de fluoresceína - FDA	68
6.4	Estimativa Eficiência de Uso de Água Disponível (EUAD)	69
6.5	Estatísticas	70
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
7.1	Resultados do fracionamento químico da MOS	72
7.1.1	Análise de variância (Anova)	72
7.1.2	Fração ácido fúlvico	73

7.1.3	Fração ácido húmico	78
7.1.4	Fração Humina	80
7.2	Resultados das análises microbiológicas	84
7.2.1	Análise de variância (Anova)	84
7.2.2	Respiração do solo	85
7.2.3	Carbono da Biomassa Microbiana	87
7.2.4	Desidrogenase	89
7.2.5	Arilsulfatase	92
7.2.6	Fluoresceína diacetato	94
7.2.7	Glicosidase	97
7.2.8	Fosfatase	98
7.3	Análise conjunta de atributos da matéria orgânica do solo e atividades enzimáticas	102
7.3.1	Análise de variância (ANOVA)	102
7.3.2	Fração ácido fúlvico	104
7.3.3	Ácido húmico	105
7.3.4	Fração humina	107
7.3.5	Carbono da biomassa microbiana	109
7.3.6	Desidrogenase	111
7.3.7	Fluoresceína diacetato	114
7.3.8	Glicosidase	116
7.3.9	Arilsulfatase	119
7.3.10	Fosfatase	122
7.3.11	Análise de Componentes Principais para o anos de 2022 (PCAs) .	124
7.3.12	Análise de Componentes Principais para o anos de 2023 (PCAs) .	129
7.4	Estimativa da Eficiência do Uso de Água Disponível (EUAD) .	135
7.4.1	Eficiência do Uso de Água Disponível para o anos de 2022 (EUAD)	135
7.4.2	Eficiência do Uso de Água Disponível para o anos de 2023 (EUAD)	140
8	CONCLUSÕES	146
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
ANEXO	170

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de produção agropecuária enfrentam continuamente o desafio de conciliar elevados níveis de produtividade com práticas sustentáveis. Entre os principais impactos ambientais associados à agropecuária destacam-se a degradação de pastagens, o uso intensivo de insumos externos e a emissão de gases de efeito estufa, fatores que têm impulsionado a adoção de sistemas integrados como estratégia de mitigação e intensificação sustentável (Assad et al., 2021; Gil et al., 2021).

Sistemas integrados de lavoura e pecuária apresentam maior eficiência no uso de recursos e contribuem para reduzir emissões de CO₂ em comparação aos sistemas extensivos convencionais, especialmente em áreas de pastagens degradadas (Gil et al., 2021).

A integração lavoura-pecuária (ILP) vem se consolidando no Brasil como uma estratégia de intensificação sustentável com forte base econômica, ao combinar eficiência produtiva, diversificação de receitas e melhor uso de recursos ao longo do ano agrícola. Em um contexto macroeconômico marcado pela relevância do agronegócio para o Produto Interno Bruto, a geração de empregos e o saldo da balança comercial, sistemas integrados ganham importância por reduzirem a ociosidade de áreas, amortecerem riscos climáticos e de preço e ampliarem a estabilidade financeira do produtor por meio da alternância e complementaridade entre culturas e pecuária (Kappes et al., 2020). Assim, a ILP se destaca como alternativa para aumentar a produtividade por área, mantendo competitividade e fortalecendo a resiliência dos sistemas agrícolas brasileiros.

No Estado de São Paulo, onde a agricultura é altamente tecnificada e inserida em cadeias produtivas intensivas, a ILP assume papel estratégico por permitir o ajuste fino do uso da terra, integrando produção vegetal e animal e favorecendo a regularidade de renda em propriedades com diferentes escalas. Além disso, a adoção de sistemas integrados tende a apoiar a sustentabilidade do setor ao combinar diversificação produtiva e maior eficiência no uso de insumos (Kappes et al., 2020). Nessa perspectiva, a ILP também contribui para a competitividade regional ao oferecer alternativas de manejo que conciliam desempenho agrônomo e conservação do solo.

No Oeste Paulista, a expansão e intensificação de usos agrícolas em paisagens frequentemente associadas a solos de maior fragilidade, incluindo materiais de textura mais arenosa em parte da região, tornam o componente econômico da ILP ainda mais relevante: o sistema pode elevar a eficiência do uso do solo e reduzir perdas produtivas associadas à degradação física e ao empobrecimento da matéria orgânica. Ao diversificar a ocupação das áreas e ampliar a cobertura vegetal, a ILP tende a melhorar a estabilidade produtiva, reduzindo sazonalidade e ampliando a previsibilidade de resultados (Lal, 2021a).

Além das vantagens econômicas, as questões ambientais são centrais no Oeste Paulista, onde desafios como erosão, compactação, redução da infiltração de água e queda de fertilidade podem emergir quando há manejo inadequado do solo e baixa proteção superficial. Nesse cenário, práticas conservacionistas comumente adotadas na região - como plantio direto, rotação de culturas, manutenção de palhada/cobertura vegetal, integração com gramíneas forrageiras e manejo racional do pastejo - tendem a reduzir perdas por erosão, favorecer a estruturação do solo e melhorar a eficiência da ciclagem de nutrientes (Oliveira et al., 2019). A presença e o manejo de plantas de cobertura e forrageiras, com sistemas radiculares densos e alta produção de resíduos, contribuem para maior aporte de carbono, formação de agregados e proteção do solo, criando condições mais estáveis para processos biogeoquímicos.

A matéria orgânica do solo e a microbiota edáfica ocupam papel central nesse equilíbrio. A matéria orgânica atua como base para a capacidade de troca de cátions, retenção de água, estabilidade de agregados e suprimento gradual de nutrientes, além de funcionar como substrato e energia para microrganismos. Por sua vez, a microbiota composta por bactérias, fungos e outros grupos, regula a decomposição de resíduos, a mineralização e imobilização de nutrientes e a formação de compostos orgânicos mais estáveis (Lal, 2021a). Indicadores biológicos, como atividades enzimáticas e atributos microbianos do solo, são especialmente úteis por responderem de forma sensível ao manejo e refletirem rapidamente alterações funcionais do solo antes que mudanças químicas e físicas se tornem evidentes (Lykov et al., 2020).

O objetivo deste trabalho foi o de avaliar o comportamento do fraciona-

mento químico da matéria orgânica, bem como o de alguns atributos microbiológicos em 5 condições de sistemas de manejo ("Pasto", "PastoILP", "CulturalLP", "Pivô" e "Floresta") em solos arenosos do Oeste Paulista no período de maio de 2022 e maio de 2023.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Contextualização econômica e estratégica da integração lavoura-pecuária (ILP)

A integração lavoura-pecuária (ILP), no escopo mais amplo dos sistemas integrados, consolidou-se no Brasil como estratégia de intensificação sustentável com forte racionalidade econômica, ao combinar elevação de produtividade por área, diversificação de receitas e melhor aproveitamento de recursos ao longo do ano agrícola (Ferraz et al., 2021; Kappes et al., 2020). Estimativas recentes indicam que o país encerrou 2024 com aproximadamente 20,1 milhões de hectares em sistemas integrados, evidenciando trajetória de expansão e reforçando a relevância da integração na agenda de competitividade e sustentabilidade do setor (Portal DBO, 2025). Em termos econômicos, a lógica central da ILP reside na redução de ociosidade de áreas, na diluição de custos fixos (máquinas, mão de obra, infraestrutura) e na mitigação de riscos de mercado e clima, uma vez que a alternância e complementaridade entre componentes agrícola e pecuário tende a aumentar a estabilidade financeira do sistema produtivo (Ferraz et al., 2021; Kappes et al., 2020).

No Estado de São Paulo, onde a agropecuária é altamente tecnificada e fortemente integrada a cadeias intensivas, a ILP assume papel estratégico por permitir ajustes de uso da terra e do calendário de produção, contribuindo para maior regularidade de renda e eficiência no uso de insumos. Esse direcionamento aparece em ações de difusão e extensão tecnológica, como o programa estadual coordenado por instituições de pesquisa e assistência técnica, que estabeleceu como meta ampliar em 1 milhão de hectares a área sob sistemas integrados no estado, indicando reconhecimento do potencial de ganhos econômicos e de eficiência do uso de recursos (Embrapa Meio Ambiente, 2022a). Em cenários de custos crescentes e volatilidade de preços de insumos, a ILP tende a se fortalecer como alternativa de organização produtiva que busca aumentar eficiência, reduzir vulnerabilidades e sustentar competitividade com menor pressão por expansão de área (Ferraz et al., 2021; Kappes et al., 2020).

No Oeste Paulista, a dimensão econômica da ILP torna-se particular-

mente relevante em paisagens com ocorrência de solos mais frágeis, incluindo materiais de textura mais arenosa em parte da região, nos quais a degradação física e a redução da matéria orgânica do solo podem comprometer produtividade e margens ao longo do tempo. Nessa condição, a integração tende a contribuir para estabilidade produtiva ao promover maior cobertura do solo, maior aporte de biomassa e diversificação de ocupação das áreas, reduzindo sazonalidade de resultados e aumentando a previsibilidade do sistema (Lal, 2021a; Santos et al., 2020).

No contexto desta tese, a comparação entre Pasto, PastoILP e CulturalILP permite discutir a ILP como estratégia de intensificação com potencial de elevar retorno por área e, simultaneamente, sustentar o capital natural do solo; o tratamento Pivô representa uma via alternativa de intensificação baseada na irrigação e maior previsibilidade hídrica; e a Floresta fornece referência de condição natural para interpretação de estabilidade funcional e de atributos indicadores.

Finalmente, a viabilidade econômica da ILP depende de processos edáficos que sustentam a produtividade e reduzem custos indiretos associados à degradação (por exemplo, erosão, compactação, queda de infiltração e declínio de fertilidade). Assim, a matéria orgânica do solo (MOS) e a microbiota edáfica assumem centralidade por influenciarem ciclagem de nutrientes, agregação, retenção de água e funcionamento biogeoquímico, com reflexos diretos na resiliência do sistema (Lal, 2021a; Santos et al., 2021).

Indicadores biológicos do solo, especialmente atividades enzimáticas e atributos microbianos, têm se destacado como ferramentas sensíveis para detectar alterações promovidas pelo manejo agrícola, respondendo rapidamente às mudanças nos sistemas de uso do solo e permitindo identificar modificações funcionais antes mesmo que atributos químicos e físicos sejam significativamente alterados. Dessa forma, esses indicadores contribuem para o monitoramento da qualidade do solo e auxiliam na tomada de decisão em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária (Barbosa et al., 2023; Sekaran et al., 2021; Silva et al., 2020).

Desse modo, a avaliação conjunta de frações da MOS e indicadores microbiológicos, como proposto neste estudo, dialoga diretamente dimensão

econômica e estratégica da ILP ao oferecer base técnica para manejo com produtividade e conservação do solo.

2.2 O sistema de manejo dos solos é realmente importante?

Os agroecossistemas são compreendidos como sistemas ecológicos modificados pela ação antrópica ao longo do tempo com o objetivo de produzir alimentos, fibras, energia e outros bens essenciais. Entretanto, o uso intensivo de insumos sintéticos e as alterações promovidas na biodiversidade influenciam diretamente os processos ecológicos e o funcionamento natural desses sistemas, afetando atributos físicos, químicos e biológicos do solo, bem como a sustentabilidade ambiental dos agroecossistemas (Beillouin et al., 2021; Duru et al., 2022; Tamburini et al., 2020).

A intensidade da exploração e cultivos dos solos irão se refletir em mudanças de maior ou menor impactos nas suas características pedogênicas, bem como em suas biodiversidades. O sistema de gestão do solo é, portanto, um dos pilares da agricultura sustentável, sendo um fator crucial que afeta suas funções e mecanismos adaptativos. Isso é extremamente relevante porque o solo fornece um ecossistema básico, que inclui desde a ciclagem de nutrientes, regulação de entrada e saída de água, utilização e processamento de materiais orgânicos e compostos tóxicos, além de um controle de pragas e doenças, capaz de gerar um equilíbrio dinâmico nestes ambientes naturais (Cagna et al., 2026).

2.3 Sistemas integrados de manejo e produção

Os sistemas integrados de produção agropecuária caracterizam-se pela integração planejada entre os componentes solo, planta, animal e atmosfera, buscando maximizar interações sinérgicas entre os diferentes sistemas produtivos. Esses sistemas promovem maior eficiência no uso de recursos naturais, incremento da produção de biomassa, grãos e carne, além de favorecerem a sustentabilidade ecológica e econômica dos agroecossistemas (de Faccio Carvalho et al., 2021; Franzluebbbers et al., 2022; Santos et al., 2023b).

No Brasil, os sistemas integrados de produção são amplamente conhecidos como integração lavoura-pecuária (ILP), caracterizando-se pela combinação

planejada entre atividades agrícolas e pecuárias em diferentes escalas espaciais e temporais. Esses sistemas envolvem a produção de grãos, forragens e animais em sucessão, consórcio ou rotação, frequentemente associados ao sistema plantio direto, visando maior eficiência no uso dos recursos naturais, diversificação produtiva e sustentabilidade econômica e ambiental das propriedades rurais (Balbino et al., 2021; de Faccio Carvalho et al., 2022; Salton et al., 2023).

2.3.1 A palhada em sistema de integração lavoura pecuária

O processo de decomposição de resíduos vegetais em solos cobertos por diferentes espécies vegetais é contínuo e altamente dinâmico, especialmente em sistemas integrados de manejo. A decomposição ocorre inicialmente pela rápida degradação de compostos hidrossolúveis e, posteriormente, pela decomposição de compostos estruturais mais recalcitrantes, como celulose, hemicelulose e lignina, cuja persistência no solo pode variar de meses a anos, dependendo da composição química do resíduo vegetal (Cotrufo et al., 2022b; Li et al., 2021a; Sousa et al., 2023).

A velocidade desse processo é fortemente controlada pela composição bioquímica dos resíduos, principalmente pelos teores de compostos estruturais presentes nos tecidos vegetais, os quais regulam a disponibilidade de carbono e energia para os microrganismos decompositores, influenciando diretamente a ciclagem de nutrientes e a dinâmica da matéria orgânica no solo (Liu et al., 2021; Silva, 2024; Xu et al., 2022).

Entre os principais constituintes estruturais dos resíduos vegetais, destacam-se a lignina, a celulose e a hemicelulose, que apresentam diferentes graus de resistência à decomposição biológica. A lignina é uma macromolécula aromática tridimensional complexa presente nas paredes celulares de plantas terrestres, associada à celulose e à hemicelulose, conferindo rigidez estrutural, impermeabilidade e resistência mecânica aos tecidos vegetais. Devido à sua elevada complexidade molecular e à presença de ligações fenólicas recalcitrantes, apresenta taxa de decomposição significativamente menor, constituindo um dos principais fatores que controlam a persistência dos resíduos no solo (Bonanomi et al., 2021; Corrales et al., 2023; Xu et al., 2022).

Resíduos vegetais com elevados teores de lignina apresentam decomposição mais lenta, favorecendo a permanência da palhada sobre a superfície do solo. Essa característica contribui para a conservação da umidade, proteção física do solo e redução de perdas por erosão, além de auxiliar na manutenção de temperaturas mais estáveis e na proteção contra impactos diretos da chuva (Ferreira et al., 2021; Mendonça et al., 2023; Teixeira et al., 2022).

A celulose representa a principal fonte de carbono estrutural nos resíduos vegetais e sua concentração tende a aumentar à medida que as plantas avançam em seu estágio fenológico, em razão da maior deposição de compostos estruturais na parede celular. Durante a decomposição, a celulose atua como importante substrato energético para os microrganismos do solo, sustentando processos metabólicos relacionados à mineralização da matéria orgânica e à ciclagem de nutrientes (Liu et al., 2021; Silva et al., 2023b; Zhang et al., 2022b).

A hemicelulose, por sua vez, constitui o segundo polissacarídeo estrutural mais abundante nos resíduos vegetais, sendo composta principalmente por hexoses, pentoses e ácidos urônicos. Sua proporção varia amplamente entre espécies, cultivares, estádios fenológicos e partes estruturais da planta, representando parcela significativa da matéria seca dos resíduos (Chen et al., 2022; Ribeiro et al., 2024; Wang et al., 2021b). Em geral, a hemicelulose apresenta decomposição mais rápida que a celulose, em razão de sua estrutura menos cristalina e menor resistência à ação microbiana (Bonanomi et al., 2021; Ferreira et al., 2023; Xu et al., 2022).

Além da composição estrutural, a decomposição dos resíduos vegetais é fortemente regulada pela relação carbono:nitrogênio (C/N), considerada um dos principais indicadores da qualidade do material vegetal. Resíduos com elevada relação C/N ($C/N > 25$), especialmente aqueles provenientes de gramíneas, apresentam decomposição mais lenta e maior estabilidade sobre o solo, favorecendo sua cobertura e proteção física. Em contrapartida, resíduos com baixa relação C/N ($C/N < 20$) apresentam decomposição acelerada, promovendo maior mineralização e ciclagem de nutrientes (Chen et al., 2021b; Oliveira et al., 2022b; Santos et al., 2024b).

Entre os macronutrientes primários, o nitrogênio exerce papel central

nesse processo, pois regula diretamente a atividade microbiana. Resíduos com elevada relação C/N promovem maior imobilização temporária de nitrogênio pelos microrganismos do solo, reduzindo sua disponibilidade imediata e retardando a mineralização. Por outro lado, resíduos com menor relação C/N disponibilizam nitrogênio mais rapidamente, favorecendo a atividade biológica e a liberação de nutrientes no sistema (Almeida et al., 2023; Wang et al., 2022c; Zhou et al., 2021).

Nesse contexto, a adequada gestão da entrada e saída de resíduos vegetais nos sistemas de cultivo é fundamental, uma vez que características como relação C/N, teores de lignina, hemicelulose e celulose regulam a decomposição dos restos culturais e influenciam processos biogeoquímicos essenciais, como ciclagem de nutrientes, dinâmica do carbono, atividade microbiana e manutenção da qualidade do solo, contribuindo diretamente para a sustentabilidade dos agroecossistemas (Chen et al., 2021b; Cotrufo et al., 2022b; de Oliveira et al., 2023).

Em pastagens, rotação soja–milho e integração lavoura-pecuária (ILP), a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) é fortemente regulada pela qualidade química dos resíduos vegetais, especialmente pelos teores de celulose, hemicelulose, lignina e pela relação C/N. Resíduos provenientes de gramíneas, como milho e forrageiras, tendem a apresentar maior proporção de compostos lignocelulósicos e relação C/N mais elevada, favorecendo decomposição mais lenta e maior participação de fungos saprófitos nas rotas oxidativas, enquanto resíduos de soja apresentam maior teor de nitrogênio e menor relação C/N, promovendo alterações na eficiência de uso do carbono e no efeito *priming* microbiano (Elias et al., 2024; Huang et al., 2023).

Estudos recentes demonstram que a decomposição da lignina é fortemente condicionada por controles geoquímicos, especialmente pela composição mineral e pela presença de metais reativos, além da estrutura da comunidade microbiana. Essas evidências indicam que a qualidade do resíduo vegetal pode não determinar diretamente a formação de MOS estabilizada, uma vez que interações entre produtos da decomposição microbiana e minerais do solo podem desacoplar a qualidade do litter da estabilização da matéria orgânica, especialmente em sistemas tropicais com elevada atividade biológica e intensa interação

micróbio–mineral (Elias et al., 2024; Huang et al., 2023).

As frações húmicas ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HU) representam compartimentos resultantes do processamento microbiano da matéria orgânica e dos mecanismos de proteção físico-química, incluindo agregação e associação com minerais, processos particularmente relevantes em Argissolos. Compostos mais lábeis, derivados da decomposição de celulose e hemicelulose, tendem a originar moléculas mais solúveis e oxigenadas, frequentemente associadas à fração AF, enquanto a formação e persistência das frações menos solúveis, como AH e especialmente HU, dependem fortemente da necromassa microbiana e de sua estabilização em associações organominerais e agregados estáveis (Angst et al., 2021; Lavallee et al., 2020).

Estudos recentes demonstram que a necromassa microbiana pode representar parcela substancial do carbono estabilizado no solo, especialmente em ambientes tropicais com alta atividade microbiana e forte interação entre matéria orgânica e minerais. Esse processo reforça que a estabilização da MOS está mais relacionada à transformação microbiana e à proteção físico-química do que à simples persistência estrutural dos resíduos vegetais originais (Lavallee et al., 2020; Liang et al., 2024).

Além disso, a contribuição da lignina para a formação da MOS não ocorre de forma linear ou direta. A composição química da lignina, seus produtos intermediários de decomposição e as vias microbianas de transformação determinam o destino desses compostos, podendo resultar tanto em mineralização quanto em incorporação em frações húmicas estabilizadas. Essa dinâmica depende do contexto edáfico, da mineralogia e das interações geoquímicas locais, o que explica variações importantes entre sistemas de manejo e classes de solo (Aswin et al., 2024; Hall et al., 2023).

Em sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP), esses processos assumem importância ainda maior, uma vez que a diversidade de espécies cultivadas e a deposição de resíduos vegetais e animais sobre o solo ampliam a heterogeneidade química da matéria orgânica. Essa diversidade de substratos resulta em diferentes padrões de decomposição, mineralização e ciclagem de nutrientes, influenciando diretamente a atividade microbiana, o acúmulo de carbono e

o funcionamento biológico do solo (Bansal et al., 2022; de Bortolli et al., 2024; Rodrigues et al., 2024b).

Dessa forma, os sistemas de integração lavoura-pecuária têm sido considerados estratégias sustentáveis de intensificação agrícola, permitindo maior eficiência no uso dos recursos naturais, incremento da produtividade e melhoria da qualidade do solo. Esses sistemas promovem benefícios físicos, químicos e biológicos, incluindo aumento da biomassa microbiana, maior atividade enzimática, incremento do carbono orgânico e melhoria da estrutura do solo, favorecendo a sustentabilidade produtiva e ambiental em longo prazo (de Faccio Carvalho et al., 2022; Franzluebbbers et al., 2022; Petry et al., 2023).

2.4 Sistemas de Integração Lavoura Pecuária (SILP) - Aspectos econômicos

A produção global de alimentos deverá crescer substancialmente nas próximas décadas para atender à crescente demanda populacional, o que impõe o desafio de ampliar a produtividade agrícola sem comprometer os recursos naturais. Nesse contexto, a intensificação sustentável da agricultura surge como estratégia essencial para conciliar segurança alimentar, conservação ambiental e redução dos impactos negativos associados aos sistemas intensivos convencionais (Barrett et al., 2022; Herrero et al., 2021; Searchinger et al., 2021).

O crescimento populacional se dá constantemente e em 2050, a estimativa é de que a população mundial ultrapassará 9,8 bilhões de pessoas. Em decorrência dessa demanda crescente por alimentos, a produção deve ser aumentada em 70% (FAO, 2022a).

O Brasil ocupa posição de destaque entre os maiores produtores e exportadores de alimentos do mundo, desempenhando papel estratégico no abastecimento global de commodities agrícolas. Paralelamente ao aumento da demanda interna e externa, o principal desafio do setor agropecuário brasileiro consiste em ampliar a produção de forma sustentável, conciliando expansão agrícola, conservação dos recursos naturais e resiliência climática, de modo a assegurar a sustentabilidade da produção no longo prazo (de Miranda et al., 2022; Nobre et al., 2023; Silva et al., 2024a; Speranza et al., 2023).

Em sistemas de produção baseados na integração lavoura-pecuária, têm sido observadas melhorias significativas, em longo prazo, nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, incluindo incremento da biomassa microbiana, maior atividade enzimática, melhoria estrutural e aumento do carbono orgânico do solo (Li et al., 2021b; Mudgal et al., 2021; Oliveira et al., 2023b; Petry et al., 2021).

Essa melhoria na qualidade do solo é consequência do efeito das adubações nas culturas, incremento dos dejetos dos animais, e ainda da intensificação da utilização da área agrícola com cultivos realizados durante todo o ano, em que a rotação de culturas permite a inclusão de espécies com diferentes sistemas radiculares, além de resíduos vegetais com diferentes relações C/N, o que contribui para alterações das taxas de decomposição e ciclagem de nutrientes (Reis et al., 2026).

O sistema plantio direto (SPD) tem se consolidado como uma das principais estratégias conservacionistas da agricultura tropical, devido aos benefícios agronômicos, econômicos e ambientais quando comparado ao preparo convencional. Contudo, sua eficiência depende diretamente da produção e manutenção de cobertura vegetal sobre o solo, sendo espécies como milho, milheto, sorgo e gramíneas forrageiras amplamente utilizadas pela elevada produção de biomassa e persistência da palhada (Ceccon et al., 2023; Salton et al., 2022; Silva et al., 2024b).

Em regiões tropicais de clima mais quente e solos de menor fertilidade natural, espécies do gênero *Urochloa* têm ampla adoção em sistemas de integração lavoura-pecuária, devido à elevada produção de biomassa, rusticidade, adaptação edafoclimática e contribuição para melhoria da estrutura física e biológica do solo (Assmann et al., 2023; Barth et al., 2024; Franzluebbbers et al., 2022).

A implantação da integração lavoura-pecuária representa alternativa estratégica para suprimento de forragem durante períodos secos, recuperação de pastagens degradadas e intensificação sustentável da produção. O uso de forrageiras anuais e perenes em sucessão às culturas de verão favorece maior produção de biomassa, incremento da matéria orgânica, melhoria da qualidade do solo e diversificação da renda, pela integração entre produção agrícola e pecuária (de Bortolli et al., 2024; de Faccio Carvalho et al., 2022; Santos et al., 2023a).

De acordo com (Santos et al., 2022), os sistemas integrados de produção agrícola são mais conservacionistas em comparação aos sistemas especializados em produção de grãos e fibra, pois confere uma melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

No Cerrado, os sistemas de integração lavoura-pecuária apresentam ampla diversidade de arranjos, sendo definidos conforme os objetivos produtivos, disponibilidade de recursos e características específicas de cada propriedade. Essas variações são influenciadas por fatores como clima, tipo de solo, infraestrutura, nível tecnológico, disponibilidade de mão de obra e experiência do produtor, resultando em diferentes estratégias de manejo e intensificação sustentável (de Faccio Carvalho et al., 2022; Franzluebbbers et al., 2022; Silva et al., 2024c).

Alterações no uso e manejo do solo podem modificar significativamente a dinâmica do carbono orgânico total, do nitrogênio total e da disponibilidade de água (Água Disponível - AD), fatores fundamentais para a atividade microbiana e para os processos de ciclagem de nutrientes e decomposição de resíduos vegetais. Essas mudanças influenciam diretamente a estabilidade dos agregados, a mineralização da matéria orgânica e o funcionamento biológico do solo (Cotrufo et al., 2022a; Lal, 2021b; Rodrigues et al., 2024a).

A implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária configura-se como alternativa conservacionista para produção simultânea de grãos, carne e leite, promovendo intensificação sustentável e melhor aproveitamento da terra. Além do incremento produtivo, esses sistemas contribuem para a preservação e melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, favorecendo o aumento da matéria orgânica, a atividade microbiana e a resiliência dos agroecossistemas (de Bortolli et al., 2024; Petry et al., 2023; Santos et al., 2023a).

2.5 Matéria orgânica do solo (MOS)

A matéria orgânica do solo (MOS) constitui-se em um dos mais relevantes indicadores de qualidade do solo, especialmente em regiões que apresentam solos com alta ação de agentes de intemperismos (Latosolos), e onde a sua fertilidade está intimamente ligada à presença de estoques de quantidade e

qualidade da MOS. Esta fração do solo também é crítica num contexto de aspectos de mudanças climáticas globais, tendo em vista que os solos representam o maior reservatório de estoques de carbono na superfície terrestre e contribuem para a mitigação de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera (Cagna et al., 2026).

A Matéria Orgânica do Solo (MOS) constitui componente essencial para o funcionamento dos agroecossistemas, atuando como reguladora da ciclagem de nutrientes, armazenamento de carbono e manutenção do equilíbrio funcional entre os compartimentos solo-planta-atmosfera. Sua dinâmica influencia diretamente a fertilidade, a resiliência dos sistemas produtivos e a sustentabilidade dos processos biogeoquímicos do solo (Cotrufo et al., 2022b; Lal, 2021b; Lehmann et al., 2023).

A MOS compreende resíduos vegetais em diferentes estágios de decomposição, biomassa microbiana, raízes vivas e mortas e frações mais estáveis associadas às substâncias húmicas. Esses componentes exercem papel determinante sobre atributos físicos, químicos e biológicos do solo, incluindo agregação, densidade, retenção e infiltração de água, ciclagem de nutrientes, capacidade de troca catiônica e suporte à atividade microbiana, funcionando como base energética para os organismos edáficos (Cotrufo et al., 2022b; Lavalley et al., 2020; Schmidt et al., 2023).

2.6 Fracionamento da matéria orgânica do solo

Devido à elevada complexidade estrutural da Matéria orgânica do solo e às suas interações com minerais, agregados e microrganismos, diferentes metodologias têm sido desenvolvidas para separar e caracterizar suas frações. Embora o conceito de compartimentalização da matéria orgânica seja consolidado há décadas, os avanços metodológicos para definição quantitativa e funcional dessas frações foram intensificados principalmente nos últimos anos, impulsionados pelo entendimento da estabilidade do carbono no solo (Cotrufo et al., 2022b; Lavalley et al., 2020; Lehmann et al., 2023).

As técnicas de fracionamento da MOS são tradicionalmente classificadas em fracionamento físico e fracionamento químico. O fracionamento físico baseia-se principalmente na separação por tamanho de partículas ou densidade,

permitindo distinguir compartimentos com diferentes graus de proteção física e estabilidade. Já o fracionamento químico explora diferenças de solubilidade e reatividade química, possibilitando a separação de frações com distintos níveis de associação mineral e recalcitrância química (Castellano et al., 2021; Lavallee et al., 2020; Schmidt et al., 2023).

As substâncias húmicas — incluindo humina, ácido húmico e ácido fúlvico — representam parcela importante do carbono estabilizado no solo (70% Carbono Orgânico Total do Solo - COT) e diferem entre si quanto à massa molecular, composição estrutural, grupos funcionais e grau de polimerização. A quantificação dessas frações tem sido amplamente utilizada como indicador da qualidade do solo, permitindo avaliar alterações decorrentes do uso, manejo e intensificação agrícola sobre os estoques e a estabilidade da matéria orgânica (Cotrufo et al., 2022b; Lehmann et al., 2023; Rumpel et al., 2021).

2.6.1 Fração ácido fúlvico da MOS

A fração Ácido fúlvico constitui um dos principais componentes das substâncias húmicas do solo, juntamente com os ácidos húmicos e a humina. Caracteriza-se por elevada solubilidade em água em ampla faixa de pH, menor massa molecular e maior mobilidade química, sendo considerada uma fração de rápida resposta às alterações no manejo e aos processos de decomposição da matéria orgânica (Cotrufo et al., 2022b; da Silva et al., 2024b; Lehmann et al., 2023).

Conforme destacam Benites et al. (2003), os ácidos fúlvicos são os compostos húmicos de maior solubilidade por apresentarem maior polaridade e menor tamanho molecular, característica que os torna fundamentalmente diferentes das outras frações húmicas.

A presença do AF no solo reflete a porção mais lábil e dinâmica do carbono orgânico, sendo considerado um bioindicador sensível da atividade biológica e da qualidade edáfica. Como afirmam Paulino et al. (2023), o ácido fúlvico é a fração da matéria orgânica do solo de menor peso molecular e maior reatividade, sendo considerado um bioindicador sensível da atividade biológica e da qualidade edáfica, representando principalmente a recente adição de resíduos

vegetais e a atividade microbiana intensa.

Conforme ressaltado por Rigrantec (2023), Ana Primavesi, reconhecida especialista em biologia do solo, explica que os ácidos fúlvicos são facilmente reconhecidos porque tingem a água escura quando a terra for agitada com água, possuindo estrutura simples e tamanho pequeno comparado aos ácidos húmicos.

O AF desempenha papel crucial na sustentabilidade do solo e na nutrição das plantas. De acordo com Huang et al. (2025), Entre os substâncias húmicas, o ácido fúlvico é o componente de menor peso molecular e o mais ativo. Ele pode otimizar a estrutura do solo aumentando a porosidade total em ambientes salino-alcálinos, melhorando assim a permeabilidade ao ar e à água. Além disso, o ácido fúlvico aumenta a estabilidade dos agregados e facilita a adsorção de água e nutrientes na forma coloidal no solo salino-alcálico, reduzindo efetivamente a perda de nutrientes.

Como bem ressalta Rigrantec (2023), com base nas observações de Ana Primavesi, os ácidos fúlvicos entram facilmente nos interstícios da rede cristalina das argilas, mobilizando o ferro e o alumínio, que se tornam trocáveis.

As substâncias húmicas, das quais o AF faz parte, conforme demonstrado por estudos de Silva et al. (2024a), constituem a maior fração de matéria orgânica (60-70%) do solo. Dentro dessas frações, o AF integra o grupo das substâncias alcálico-solúveis. Segundo Reis et al. (2026), as frações F1 e F2 são mais lábeis, estão associadas com a disponibilidade de nutrientes e a formação de macroagregados.

Essa característica torna o AF fundamental para a estrutura física do solo e para os processos de ciclagem de nutrientes.

2.6.2 Fração ácido húmico da MOS

A fração húmica (AH) da matéria orgânica do solo (MOS) é um dos principais componentes das substâncias húmicas, reconhecida por sua maior estabilidade e peso molecular relativamente elevado em relação ao ácido fúlvico. Conforme destaca o Centro Internacional de Substâncias Húmicas (IHumico), os ácidos húmicos atuam como quelantes, ligando-se aos nutrientes do solo e tornando-os mais disponíveis para as raízes das plantas, além de melhorarem

a estrutura e a fertilidade do solo ao aumentar a capacidade de troca catiônica e promover a agregação do solo, o que favorece o crescimento radicular e a retenção de água, reduzindo o estresse hídrico (Ihumico, 2025).

O ácido húmico é a fração da matéria orgânica do solo que se dissolve em solução alcalina, mas é insolúvel em ácidos fortes, configurando-se como a parte mais estável do húmus comparado ao ácido fúlvico, que é mais solúvel e de peso molecular menor (Santos et al., 2022).

De acordo com Ottoy et al. (2022), o ácido húmico representa a fração mais duradoura da reserva total de carbono orgânico no solo, podendo compor de 85% a 90% desse pool, o que evidencia sua importância para a sustentabilidade e qualidade do solo. Silva et al. (2022), em estudo sobre frações da MOS, enfatizam que o AH está diretamente ligado à estabilidade dos agregados do solo e à resiliência frente aos distúrbios de manejo, além de ser um componente essencial para o sequestro de carbono a longo prazo.

Em sua composição molecular, o ácido húmico é formado por uma complexa mistura de polifenóis, ácidos carboxílicos, estruturas aromáticas condensadas e cadeias alifáticas, caracterizando-se por apresentar grupos funcionais como carboxilas, fenóis e quinonas que conferem alta capacidade de complexação de metais e cátions essenciais, além de desempenho relevante na formação e estabilização de macroagregados do solo (Rosa et al., 2021). Weber et al. (2024) ressaltam que essa composição molecular confere ao AH propriedades únicas de interação com minerais do solo, favorecendo a formação de complexos organominerais estáveis.

A importância do ácido húmico reside em vários benefícios para o solo e plantas: melhora da fertilidade química por aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC), condicionamento físico pela promoção da agregação, maior retenção de água e resistência à erosão, além de estímulo à atividade microbiana que libera nutrientes de forma gradual (Ihumico, 2025). Estudos recentes de López et al. (2023) demonstraram que solos com maior teor de ácido húmico apresentaram maior produtividade agrícola, especialmente em sistemas sustentáveis e integrados.

2.6.3 Fração humina da MOS

A fração humina da Matéria orgânica do solo corresponde à porção mais estável das substâncias orgânicas do solo, caracterizada por forte associação com a matriz mineral e elevada resistência à degradação biológica. Sua baixa solubilidade e forte interação organomineral dificultam a extração e a caracterização estrutural, sendo reconhecida como importante reservatório de carbono de longa permanência em solos agrícolas e naturais (Cotrufo et al., 2022b; Lehmann et al., 2023; Rumpel et al., 2021).

A humina resulta de processos avançados de transformação e estabilização da matéria orgânica, com predominância de compostos altamente condensados e estruturas aromáticas complexas. Esse arranjo molecular contribui para sua elevada recalcitrância, reduzindo a taxa de decomposição microbiana e favorecendo a permanência do carbono no solo em escalas temporais prolongadas (Lavallee et al., 2020; Schmidt et al., 2023).

A presença da humina contribui para a estabilidade estrutural do solo, favorecendo a formação de agregados, retenção de água e adsorção de nutrientes. Além disso, sua elevada persistência a torna componente relevante no sequestro de carbono e na mitigação das mudanças climáticas em sistemas agrícolas conservacionistas (Chen et al., 2024; Cotrufo et al., 2022b; Lal, 2021b).

A humina também exerce papel importante na ciclagem de nutrientes, especialmente pela retenção de cátions, complexação de micronutrientes e adsorção de elementos potencialmente tóxicos, contribuindo para a redução de perdas por lixiviação e para maior estabilidade química do sistema solo (da Silva et al., 2024c; Rumpel et al., 2021; Zhang et al., 2023b).

Em termos estruturais, a humina apresenta composição heterogênea, formada por associações entre compostos aromáticos, cadeias alifáticas e grupos funcionais oxigenados, fortemente protegidos por interações organominerais. Sua estabilidade está mais relacionada à proteção física e química do que apenas à recalcitrância intrínseca das moléculas (Cotrufo et al., 2022b; Lehmann et al., 2023; Schmidt et al., 2023).

2.7 Aspectos microbiológicos do solo e sua importância

2.7.1 Qualidade do solo

A Qualidade do solo é um conceito multidimensional que integra atributos físicos, químicos e biológicos, refletindo a capacidade do solo em sustentar produtividade, regular processos ambientais e manter o funcionamento ecológico. Nos últimos anos, os atributos biológicos têm recebido maior destaque por sua elevada sensibilidade às alterações de manejo e por permitirem diagnóstico mais precoce das mudanças funcionais do sistema (Bünemann et al., 2020; Karlen et al., 2021; Lehmann et al., 2020).

A manutenção de níveis adequados de qualidade do solo depende da interação entre fatores edafoclimáticos, espécies vegetais, intensidade de uso e ações antrópicas. Nesse contexto, o uso de indicadores biológicos tem se consolidado como ferramenta para mensurar desequilíbrios funcionais, avaliar impactos do manejo e monitorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Nannipieri et al., 2020; Oliveira et al., 2023a; Sousa et al., 2024).

Alterações nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo são interdependentes e refletem diretamente os sistemas de manejo adotados. Entre os indicadores biológicos, a biomassa microbiana destaca-se como um dos mais sensíveis, sendo amplamente utilizada para detectar alterações no uso da terra, na ciclagem de nutrientes e no potencial de sustentabilidade econômica, ambiental e produtiva dos agroecossistemas (Bastida et al., 2021; da Silva et al., 2024d; Doran et al., 2021).

2.8 Indicadores de Qualidade do Solo (IQS)

2.8.1 Indicadores Físicos de Qualidade do Solo (IFQS)

Os Indicadores físicos de qualidade do solo incluem atributos relacionados à organização estrutural do solo, como distribuição granulométrica, estabilidade de agregados, densidade, porosidade total e distribuição entre macro e microporos. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar a capacidade do solo em armazenar água, permitir trocas gasosas, favorecer o crescimento radicular e sustentar processos biológicos, sendo amplamente utilizados na avaliação da

qualidade física em sistemas agrícolas e conservacionistas (Bünemann et al., 2020; da Silva et al., 2024a; Reynolds et al., 2021).

A distribuição granulométrica (teores de areia, silte e argila) constitui um indicador textural basal por condicionar, de forma relativamente estável, a retenção de água, a aeração e a vulnerabilidade a processos degradativos como selamento e erosão. Essa herança textural regula a área específica e a organização do sistema poroso, definindo limites físicos para o armazenamento hídrico e o fluxo de água e ar. Respostas estruturais e hidráulicas ao manejo (p.ex., compactação) são dependentes da textura, especialmente do conteúdo de partículas finas (silte+argila), o que reforça o papel da granulometria como referência interpretativa para indicadores dinâmicos de qualidade (De Lima et al., 2022; Wang et al., 2024).

Nesse contexto, o grau de agregação/estabilidade de agregados expressa a capacidade do solo em manter uma arquitetura estrutural resistente às forças de desagregação (chuva, tráfego de máquinas, revolvimento do solo), conectando textura, carbono orgânico e atividade biológica a funções hidrológicas e mecânicas. Agregados estáveis tendem a reduzir dispersão, encrostamento e perda de partículas, preservando a continuidade de poros e favorecendo infiltração e redistribuição de água no perfil (Abshiba et al., 2025; Soil Aggregate Dynamics and Stability, 2025).

A porosidade total e a distribuição de macro e microporos representam a manifestação funcional da interação entre textura, estrutura e estado de compactação. Enquanto macroporos sustentam aeração, drenagem e, em muitos casos, fluxos preferenciais, microporos concentram o armazenamento de água e modulam a disponibilidade hídrica às plantas (De Lima et al., 2022).

A integração desses três indicadores é particularmente relevante para discutir a água disponível (AD) às plantas, pois a textura define o potencial de retenção, a agregação controla a estabilidade da estrutura que sustenta o sistema poroso e a distribuição de poros determina o particionamento entre armazenamento e transmissão de água. Assim, solos com mesma textura podem apresentar desempenhos hídricos contrastantes quando diferem em estabilidade de agregados e em macroporosidade (por compactação, erosão ou manejo), o que afeta tanto a infiltração quanto a recarga de microporos associados ao

armazenamento (Abshiba et al., 2025; Wang et al., 2024).

Do ponto de vista normativo e aplicado ao planejamento agrícola, a Instrução Normativa SPA/MAPA nº 1, de 21 de junho de 2022, no âmbito do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), consolida o conceito de Água Disponível (AD) como parâmetro para classificação de solos em seis classes (AD1 a AD6), estimada a partir dos teores de areia total, silte e argila, medidos na camada de 0–40 cm, por meio de um modelo estabelecido pela própria normativa (BRASIL, 2022).

Essa mudança metodológica é relevante porque desloca a classificação de solo no ZARC de um critério predominantemente baseado em argila para um enquadramento que incorpora explicitamente a granulometria completa (areia–silte–argila), elevando a precisão na estimativa do risco hídrico e reforçando a ligação entre indicadores texturais e a gestão climática do risco de produção (Banco Central do Brasil, 2023; BRASIL, 2022).

Finalmente, ao conectar a AD do ZARC aos indicadores de qualidade do solo, observa-se uma convergência conceitual. A AD é uma variável-síntese do potencial de armazenamento de água utilizável pelas plantas, derivada da textura (base) e modulada, na prática, por estrutura/porosidade – ou seja, por atributos que podem ser melhorados ou degradados pelo manejo. Por isso, mesmo quando a classificação do ZARC utiliza a granulometria como entrada para estimar AD, a interpretação agrônômica do desempenho hídrico no campo deve considerar a condição estrutural (agregação) e o estado físico (compactação e distribuição de poros), que podem alterar a infiltração efetiva, a redistribuição de água e a exploração radicular, impactando o risco real de déficit hídrico dentro de uma mesma classe textural (De Lima et al., 2022; Wang et al., 2024).

Nesse sentido, a abordagem integrada entre indicadores texturais/estruturais e a AD contribui para interpretações mais consistentes sobre aspectos físicos, químicos e biológicos do solo.

Com isso, foi desenvolvido um índice, denominado de Índice de Eficiência do Uso da Água (IEUA), com a finalidade de melhor visualizar a dinâmica dos atributos estudados em função da disponibilidade indireta hídrica e textural de cada sistema avaliado.

2.8.2 Indicadores Biológicos de Qualidade do Solo (IBQS)

Propriedades biológicas e bioquímicas do solo, como Carbono da biomassa microbiana, Nitrogênio da biomassa microbiana, atividade enzimática, respiração basal, quociente metabólico e diversidade microbiana, são reconhecidas como indicadores altamente sensíveis das alterações promovidas pelo manejo. Esses atributos permitem detectar mudanças funcionais precoces no solo, sendo amplamente utilizados no monitoramento de impactos ambientais, na avaliação da dinâmica da matéria orgânica e na interpretação da sustentabilidade de sistemas agrícolas intensificados e integrados (Bastida et al., 2021; da Silva et al., 2024d; Nannipieri et al., 2020; Oliveira et al., 2023a).

2.8.2.1 Biomassa microbiana do solo (BMS)

A biomassa microbiana do solo (BMS) constitui a fração viva e metabolicamente ativa da matéria orgânica, sendo responsável pela regulação de processos fundamentais, como ciclagem, retenção, transformação e disponibilização de nutrientes. Além de atuar nos processos de adsorção e lixiviação, a comunidade microbiana influencia diretamente a dinâmica do carbono e a estabilidade química do solo, respondendo de forma sensível às alterações de manejo, uso da terra e condições edafoclimáticas (Kaschuk et al., 2020; Li et al., 2020).

Os atributos microbiológicos do solo permitem avaliar a variabilidade espacial e temporal da disponibilidade de nutrientes e das propriedades físicas, químicas e biológicas do ambiente edáfico. Esses parâmetros refletem a atividade da microbiota e sua interação com o solo, funcionando como importantes indicadores da sustentabilidade e funcionalidade dos sistemas produtivos (Cherubin et al., 2020; Joergensen et al., 2024).

A biomassa microbiana é amplamente utilizada como indicador da qualidade do solo por representar uma fração altamente sensível às mudanças nos estoques de matéria orgânica e nas condições do perfil edáfico. Os microrganismos presentes na rizosfera exercem papel central nas interações solo-planta, atuando em processos como decomposição, mineralização, imobilização e transformação de compostos orgânicos, o que a torna um parâmetro eficiente para monitorar alterações decorrentes do manejo agrícola (Liu et al., 2024; Zhou et al.,

2020a).

Além disso, a biomassa microbiana está associada à fertilidade do solo, atuando como reservatório temporário de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre. Esses elementos são continuamente reciclados pela atividade microbiana, participando da decomposição da matéria orgânica e da manutenção da disponibilidade nutricional às plantas, sendo fundamentais para a estabilidade e produtividade dos agroecossistemas (Chen et al., 2021b; Pereira et al., 2024; Wang et al., 2023a).

2.8.2.2 Carbono da biomassa microbiana (CBM)

A biomassa microbiana de carbono é reconhecida como a fração viva da matéria orgânica do solo e um componente central nos processos biogeoquímicos, especialmente na transformação, retenção e disponibilização de nutrientes. Por sua rápida resposta às alterações ambientais e ao manejo, sua quantificação permite detectar mudanças precoces nas propriedades biológicas e na qualidade do solo em diferentes sistemas de uso da terra (Joergensen et al., 2024; Kaschuk et al., 2020).

A avaliação da biomassa microbiana de carbono é particularmente útil para identificar alterações causadas por práticas agrícolas, preparo do solo, mudanças no uso da terra e supressão da vegetação nativa. Esse atributo apresenta elevada sensibilidade a perturbações físicas e químicas, podendo indicar processos de degradação ou recuperação da funcionalidade edáfica (Cherubin et al., 2020; Li et al., 2020).

A biomassa microbiana de carbono (CBM) é amplamente reconhecida como um dos principais bioindicadores da qualidade biológica do solo, pois reflete diretamente a atividade microbiana e a capacidade funcional dos ecossistemas edáficos. Sua relação com os estoques de carbono e a ciclagem de nutrientes permite inferir a sustentabilidade de sistemas agrícolas e pastoris, sendo amplamente utilizada na avaliação de práticas conservacionistas (Liu et al., 2024; Wang et al., 2023b).

Além disso, a CBM é considerada um indicador dinâmico, capaz de responder rapidamente às mudanças de manejo e às condições ambientais. Sua variação é fortemente influenciada pela disponibilidade de substrato orgânico,

cobertura vegetal e intensidade de uso do solo, tornando-a um parâmetro eficiente para monitorar a qualidade biológica em agroecossistemas (Chen et al., 2021a; Zhou et al., 2020b).

2.8.2.3 Nitrogênio da biomassa microbiana (NBM)

Grande parte do nitrogênio presente no solo encontra-se na forma orgânica, associado à matéria orgânica e à biomassa microbiana, não estando imediatamente disponível para absorção pelas plantas. A transformação desse nitrogênio em formas minerais assimiláveis depende da atividade microbiana e da decomposição dos resíduos orgânicos, sendo fortemente influenciada pelo manejo do solo, pelas condições climáticas e pelas características edáficas (Chen et al., 2021a; Zhou et al., 2020b).

As práticas de cultivo, o revolvimento do solo, o aporte de resíduos vegetais e fatores ambientais, como temperatura e umidade, alteram a taxa de mineralização do nitrogênio, afetando diretamente a disponibilidade desse nutriente. Nesse contexto, o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) é considerado um indicador importante da qualidade do solo, por refletir a dinâmica de imobilização e liberação de nitrogênio nos sistemas agrícolas (Liu et al., 2024; Wang et al., 2023b).

A estimativa do nitrogênio potencialmente mineralizável é frequentemente realizada por meio da incubação do solo, quantificando-se o nitrogênio mineral liberado pela atividade microbiana ao longo do tempo. Esse método permite avaliar a capacidade do solo em fornecer nitrogênio às plantas, podendo ser conduzido em condições aeróbias ou anaeróbias, conforme o objetivo experimental (Chen et al., 2023b; Li et al., 2020).

O processo de mineralização ocorre quando compostos orgânicos nitrogenados são decompostos pelos microrganismos, liberando formas inorgânicas, como amônio e nitrato, passíveis de absorção pelas plantas. Durante esse processo, o carbono orgânico é utilizado como fonte energética, enquanto o nitrogênio é convertido e disponibilizado no sistema solo-planta (Chen et al., 2021a; Zhang et al., 2022a).

Em contraste, a imobilização ocorre quando os microrganismos incorpo-

ram o nitrogênio mineral à sua biomassa para atender às suas necessidades metabólicas. Assim, parte do nitrogênio liberado pela decomposição permanece temporariamente retido na biomassa microbiana, contribuindo para o equilíbrio da ciclagem de nutrientes e para a manutenção da fertilidade do solo (Wang et al., 2023b; Zhou et al., 2020b).

2.8.2.4 Atividade do diacetato de fluoresceína (FDA)

A atividade de hidrólise do fluoresceína diacetato (FDA) é amplamente empregada como um método rápido e sensível para avaliar a atividade microbiana total do solo, por refletir a ação integrada de diferentes enzimas hidrolíticas, como esterases, lipases e proteases. A hidrólise do FDA representa um indicador da atividade metabólica global da microbiota, permitindo inferir alterações funcionais em ambientes naturais e sistemas agrícolas sob diferentes manejos (Paz et al., 2023; Zapata-Hernández et al., 2022).

A molécula de FDA, inicialmente incolor, é hidrolisada por enzimas produzidas por bactérias, fungos e outros microrganismos do solo, liberando fluoresceína, cuja concentração pode ser determinada por espectrofotometria. Essa característica torna o método eficiente para quantificar a atividade microbiana e detectar mudanças relacionadas ao uso da terra, manejo e perturbações ambientais (Santos et al., 2024a; Wei et al., 2021).

A atividade de FDA é considerada um indicador bioquímico integrador, pois reflete a soma da atividade hidrolítica associada à decomposição da matéria orgânica e à ciclagem de nutrientes. Sua elevada sensibilidade às mudanças ambientais permite monitorar respostas microbianas a práticas de manejo, sistemas de cultivo e variações nas condições edáficas (Martins et al., 2023; Zapata-Hernández et al., 2022).

Sua importância como bioindicador decorre da capacidade de fornecer informações rápidas e consistentes sobre a saúde do solo, especialmente em estudos voltados à sustentabilidade agrícola. Diversos trabalhos recentes demonstram forte correlação entre a atividade de FDA, a respiração basal, o carbono da biomassa microbiana e outras enzimas do solo, indicando seu potencial como indicador da funcionalidade ecológica dos agroecossistemas (Paz et al., 2023;

Wei et al., 2021).

Além disso, a metodologia destaca-se pela simplicidade operacional, baixo custo e alta aplicabilidade em diferentes classes de solo, sendo utilizada em monitoramentos de longo prazo e em estudos de impactos do manejo conservacionista. Sua resposta à umidade, cobertura vegetal e sistemas de cultivo a torna uma ferramenta robusta para avaliação da qualidade biológica do solo (Martins et al., 2023; Santos et al., 2024a).

Dessa forma, a atividade de FDA constitui um parâmetro bioquímico central em estudos microbiológicos do solo, auxiliando na definição de estratégias de manejo voltadas à conservação da matéria orgânica, biodiversidade microbiana e sustentabilidade dos sistemas produtivos (Paz et al., 2023; Zapata-Hernández et al., 2022).

2.8.2.5 Atividade de desidrogenase (DNASE)

A atividade da desidrogenase é amplamente utilizada como indicador da atividade microbiana do solo por estar diretamente associada às células metabolicamente ativas. Essa enzima participa dos processos respiratórios intracelulares, atuando na cadeia transportadora de elétrons e refletindo a intensidade das reações oxidativas envolvidas na decomposição da matéria orgânica (Adetunji et al., 2021; Zhang et al., 2023a).

Por estar ligada exclusivamente às células vivas e não ocorrer de forma extracelular, a desidrogenase é considerada um indicador sensível das alterações no metabolismo microbiano e das mudanças na qualidade biológica do solo. Sua atividade está relacionada à transferência de elétrons e hidrogênios para coenzimas como NAD^+ e FAD, desempenhando papel fundamental nos processos de oxidação biológica e ciclagem de nutrientes (Paz et al., 2023; Wang et al., 2022a).

A atividade dessa enzima responde rapidamente às alterações provocadas pelo manejo, uso da terra, disponibilidade de matéria orgânica e condições ambientais, sendo amplamente utilizada em estudos de monitoramento da qualidade do solo. Sua quantificação permite detectar perturbações físicas e químicas que afetam o metabolismo da microbiota edáfica (Martins et al., 2023; Santos

et al., 2024a).

Na metodologia analítica, o cloreto de trifeniltetrazólio (TTC) é utilizado como aceptor artificial de elétrons, sendo reduzido pela atividade microbiana a trifenilformazan (TPF), composto quantificável por espectrofotometria. Esse método permite estimar a atividade respiratória global da microbiota e avaliar o potencial biológico do solo sob diferentes sistemas de manejo (Adetunji et al., 2021; Wei et al., 2021).

A redução do TTC é influenciada por fatores químicos do solo, incluindo a disponibilidade de nutrientes e elementos redox ativos, como ferro, manganês e formas minerais de nitrogênio. Por essa razão, o ensaio requer condições controladas de incubação, geralmente em ambiente com baixa disponibilidade de oxigênio, de forma a evitar interferências na transferência de elétrons e garantir a comparabilidade entre amostras (Wang et al., 2022b; Zhang et al., 2023a).

A atividade da desidrogenase tem sido considerada um dos principais indicadores bioquímicos da qualidade do solo, apresentando alta sensibilidade a práticas agrícolas, preparo do solo, cobertura vegetal e sistemas integrados de produção. Sua utilização em experimentos de longo prazo permite compreender a dinâmica microbiana e subsidiar estratégias de manejo voltadas à conservação da matéria orgânica e sustentabilidade dos agroecossistemas (Martins et al., 2023; Paz et al., 2023).

2.8.2.6 Atividade da beta glicosidase (β glicosidase - GLI)

A atividade da enzima beta-glicosidase (GLI) é fundamental no solo, atuando na degradação de compostos celulósicos ao catalisar a hidrólise de ligações beta-glicosídicas, liberando moléculas de glicose que servem de substrato energético para a microbiota do solo. Essa enzima integra o grupo das glicosidases envolvidas no metabolismo de carboidratos complexos, sendo um componente chave para a ciclagem de carbono e transformação da matéria orgânica (Kumar et al., 2021; Wang et al., 2020). Sua atividade é especialmente relevante por representar uma etapa limitante na decomposição da celulose, o maior componente da biomassa vegetal, influenciando diretamente a dinâmica do carbono e a fertilidade do solo.

A função principal da beta-glicosidase no solo está relacionada à mineralização da matéria orgânica, facilitando a liberação de carbono assimilável pelos microrganismos e plantas, além de participar da regulação do ciclo do carbono que impacta processos ecológicos de sequestro e emissão de gases de efeito estufa (Deng et al., 2019; Liu et al., 2022). Contudo, sua atividade reflete não apenas o metabolismo microbiano local, mas também a disponibilidade de substratos e as condições ambientais, tornando-se um indicador sensível às variações de manejo agrícola, uso do solo e alterações climáticas (Medina-Roldán et al., 2023).

A importância da atividade desta enzima como bioindicador reside na sua alta sensibilidade às mudanças no status da matéria orgânica do solo e à saúde microbiana. Por ser uma enzima extracelular produzida pelos microrganismos, sua atividade reflete a capacidade funcional da microbiota em decompor resíduos vegetais e manter os ciclos biogeoquímicos ativos, permitindo a avaliação da qualidade e do potencial produtivo do solo (Singh et al., 2021).

Estudos recentes apresentam correlações fortes entre atividade de beta-glicosidase, teor de carbono orgânico e outras propriedades microbiológicas, consolidando seu uso em monitoramentos ambientais e em programas de manejo sustentável (Fernández-Calviño et al., 2022).

Além disso, o monitoramento da atividade de beta-glicosidase tem sido aplicado em experimentos de longo prazo para avaliar os efeitos de práticas como a rotação de culturas, uso de fertilizantes orgânicos e conservação do solo, fornecendo dados fundamentais para a formulação de estratégias que promovam a sustentabilidade agrícola (Espantoso et al., 2023; Zhou et al., 2020a).

Sua medição é realizada por métodos enzimáticos que possibilitam resultados rápidos e sensíveis, adaptáveis para análise em diferentes tipos de solo e ambientes, o que a torna uma ferramenta valiosa para cientistas e gestores ambientais.

Por fim, a atividade de beta-glicosidase representa um indicador integrado do estado funcional da microbiota do solo e da qualidade ambiental, contribuindo para a compreensão dos processos ecológicos subjacentes e a manutenção da fertilidade natural dos solos. Seu uso contínuo e aprimorado no monitoramento ambiental é imprescindível para garantir práticas agrícolas que conservem a

biodiversidade microbiana e a resiliência dos ecossistemas terrestres (Kumar et al., 2021; Medina-Roldán et al., 2023).

2.8.2.7 Atividade da arilsulfatase (ARIL)

A atividade da enzima arilsulfatase (ARIL) no solo é essencial para a ciclagem do enxofre, catalisando a hidrólise de ésteres de sulfato, liberando sulfato inorgânico disponível para a microbiota e plantas. Essa enzima é produzida por microrganismos e está diretamente ligada à mineralização do enxofre orgânico, um nutriente fundamental para o crescimento vegetal e processos metabólicos microbianos (Mendes et al., 2020).

A atividade da arilsulfatase é amplamente utilizada como indicador da qualidade biológica do solo, sendo determinada pela liberação de p-nitrofenol a partir da hidrólise de substratos específicos, com quantificação por espectrofotometria. Esse método é considerado sensível para avaliar a atividade microbiana relacionada à ciclagem do enxofre e às transformações bioquímicas da matéria orgânica em diferentes sistemas de manejo (Santos et al., 2024a; Silva et al., 2022).

A arilsulfatase participa diretamente da mineralização de compostos orgânicos sulfurados, promovendo a liberação de sulfato, forma assimilável pelas plantas. Dessa forma, sua atividade reflete não apenas a disponibilidade de enxofre no solo, mas também a intensidade dos processos microbianos ligados à decomposição da matéria orgânica e à ciclagem de nutrientes (Wang et al., 2023b; Zhang et al., 2021).

Além disso, a atividade dessa enzima é considerada um indicador sensível das alterações no manejo e uso do solo, respondendo às mudanças na cobertura vegetal, adição de resíduos orgânicos, fertilização e intensidade de revolvimento. Sua quantificação tem sido amplamente empregada para avaliar a sustentabilidade de sistemas agrícolas e a manutenção das funções ecológicas do solo (Li et al., 2024; Martins et al., 2023).

A importância da arilsulfatase ultrapassa a avaliação isolada do enxofre, pois sua atividade está intimamente associada à dinâmica da matéria orgânica e ao equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos. Assim, esse atributo enzimático contribui

para a compreensão da capacidade do solo em sustentar processos ecológicos essenciais à produtividade agrícola e à conservação ambiental (Silva et al., 2022; Wang et al., 2023b).

A disponibilidade de enxofre proveniente da ação da arilsulfatase é determinante para a síntese de aminoácidos e enzimas, contribuindo para o funcionamento da microbiota e a saúde do solo (Mendes et al., 2020; Zapata-Hernández et al., 2022). Além disso, o funcionamento da arilsulfatase é relativamente sensível a mudanças no manejo do solo, como a rotação de culturas e sistemas integrados, tornando-se um parâmetro útil para monitorar impactos ambientais e estratégias de manejo (Espantoso et al., 2023).

A arilsulfatase também é reconhecida como um bioindicador confiável da atividade da microbiota do solo, uma vez que a sua medição permite avaliar rapidamente o estado funcional da comunidade microbiana e sua resposta a fatores ambientais, como variações na matéria orgânica, contaminação e uso intensivo do solo (Medina-Roldán et al., 2023; Zapata-Hernández et al., 2022).

Estudos demonstram que a atividade da arilsulfatase correlaciona-se positivamente com atributos microbiológicos e químicos do solo, confirmando seu uso em avaliações integradas de qualidade e saúde do solo (Mendes et al., 2020).

Além disso, a simplicidade e sensibilidade do método de determinação da arilsulfatase têm permitido sua ampla aplicação em experimentos de curta e longa duração, incluindo sistemas agroflorestais, pastagens e cultivos convencionais, conferindo suporte técnico para gestão sustentável dos solos tropicais (Espantoso et al., 2023; Zapata-Hernández et al., 2022). A técnica possibilita identificar degradações e melhorias nos ecossistemas do solo, facilitando decisões para práticas agrícolas que promovam a conservação dos processos microbianos essenciais à fertilidade natural (Embrapa, 2020).

Por fim, a atividade da arilsulfatase representa um elo crucial entre o ciclo do enxofre e a manutenção da microbiota funcional do solo, refletindo diretamente a capacidade do solo em sustentar processos ecológicos fundamentais à agricultura sustentável e à conservação ambiental. O acompanhamento contínuo dessa enzima contribui para a melhora dos indicadores biológicos do solo, o que é indispensável para o desenvolvimento de sistemas produtivos resilientes e

equilibrados (Medina-Roldán et al., 2023; Mendes et al., 2020).

2.8.2.8 Atividade da fosfatase ácida (FOS)

A atividade da enzima fosfatase ácida (FOS) é um dos principais indicadores biológicos utilizados para avaliar a qualidade do solo, especialmente em relação à ciclagem do fósforo. Essa enzima catalisa a hidrólise de ésteres de fosfato, liberando fosfato inorgânico disponível para a microbiota e plantas, sendo fundamental para a mineralização da matéria orgânica rica em fósforo (Morquillas et al., 2022; Rodrigues et al., 2022).

A fosfatase ácida atua preferencialmente em solos ácidos, onde sua atividade é mais expressiva, refletindo a capacidade do solo em disponibilizar fósforo para processos biológicos essenciais (Soares, 2021).

A função da fosfatase ácida no solo está diretamente ligada à disponibilidade de fósforo, nutriente crítico para o crescimento vegetal e para o funcionamento da microbiota edáfica. Sua atividade é influenciada por fatores como pH, teor de matéria orgânica, práticas de manejo e presença de microrganismos, tornando-se um parâmetro sensível para monitorar mudanças na qualidade do solo (Morquillas et al., 2022; Rodrigues et al., 2022).

A fosfatase ácida participa ativamente da ciclagem do fósforo, contribuindo para a manutenção da fertilidade e da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Soares, 2021).

A importância da atividade da fosfatase ácida como bioindicador reside na sua capacidade de refletir o estado funcional da microbiota do solo e a dinâmica da matéria orgânica. Estudos recentes demonstram que a atividade dessa enzima se correlaciona positivamente com atributos microbiológicos e químicos do solo, confirmando seu uso em avaliações integradas de qualidade e saúde do solo (Morquillas et al., 2022; Rodrigues et al., 2022).

A fosfatase ácida é especialmente útil em experimentos de longa duração, permitindo identificar degradações e melhorias nos ecossistemas do solo (Soares, 2021).

Além disso, a simplicidade e sensibilidade do método de determinação da fosfatase ácida têm permitido sua ampla aplicação em diferentes sistemas

de manejo, incluindo plantio direto, preparo convencional e uso de plantas de cobertura. A técnica possibilita identificar impactos ambientais e estratégias de manejo, facilitando decisões para práticas agrícolas que promovam a conservação dos processos microbianos essenciais à fertilidade natural (Morquillas et al., 2022; Rodrigues et al., 2022).

Por fim, a atividade da fosfatase ácida representa um elo crucial entre o ciclo do fósforo e a manutenção da microbiota funcional do solo, refletindo diretamente a capacidade do solo em sustentar processos ecológicos fundamentais à agricultura sustentável e à conservação ambiental.

O acompanhamento contínuo dessa enzima contribui para a melhora dos indicadores biológicos do solo, o que é indispensável para o desenvolvimento de sistemas produtivos resilientes e equilibrados (Morquillas et al., 2022; Soares, 2021).

2.8.2.9 Respiração da biomassa microbiana do solo (RBMS)

A respiração da biomassa microbiana do solo (RBMS) refere-se à quantidade de dióxido de carbono (CO_2) liberada pela atividade metabólica da comunidade microbiana presente no solo, sendo um indicador direto da atividade biológica e metabólica do microbioma edáfico (Silva et al., 2021).

Esse processo representa a decomposição da matéria orgânica pela microbiota e é fundamental para o ciclo do carbono no solo, refletindo o fluxo de energia e nutrientes essenciais às plantas e microrganismos (Nunes et al., 2022). A RBMS é quantificada geralmente pela incubação de amostras de solo em condições controladas e medição do CO_2 liberado, sendo uma métrica sensível para avaliar a saúde e vigor da microbiota.

A função principal da RBMS é indicar o grau de atividade e funcionalidade metabólica da microbiota do solo, portanto, um solo com alta taxa respiratória microbiana revela elevada degradação da matéria orgânica e transformação de substratos, o que contribui para a fertilidade edáfica (Siqueira et al., 2020). Além disso, a respiração da biomassa microbiana está diretamente associada à capacidade de ciclagem de nutrientes e à dinâmica do carbono orgânico no solo, influenciando processos de mineralização e disponibilidade de nutrientes para as

plantas (Cagna et al., 2026).

Por isso, atividade respiratória serve como um indicador sensível para mudanças provocadas pelo uso do solo e manejo agrícola.

A importância da RBMS como bioindicador da atividade microbiana decorre da sua correlação com outros parâmetros biológicos e químicos do solo, como o carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, frações de carbono orgânico e atividades enzimáticas (Rodrigues et al., 2022). Estudos recentes mostram que a RBMS é capaz de detectar alterações iniciais causadas pelo manejo inadequado, degradação ou recuperação do solo, fornecendo dados críticos para o monitoramento da qualidade ambiental e sustentabilidade dos agroecossistemas (Oliveira et al., 2021).

Além disso, o índice metabólico, qCO_2 , que relaciona a respiração basal à biomassa microbiana, indica a eficiência do uso de carbono pela microbiota.

A metodologia para mensurar a RBMS é amplamente utilizada em experimentos científicos e avaliações ambientais, por sua praticidade, sensibilidade e capacidade de refletir o estado funcional da microbiota do solo em curto prazo (Siqueira et al., 2020).

Essa atividade é particularmente útil para analisar os efeitos de diferentes sistemas de uso e manejo do solo, como queimadas, cultivo convencional, sistemas agroflorestais e pastagens, sendo capaz de diferenciar solos mais ou menos impactados (Nunes et al., 2022).

Por fim, a respiração da biomassa microbiana do solo configura-se como um indicador crucial para o entendimento da ecologia microbiana e sua interação com o ambiente edáfico, refletindo diretamente a qualidade e funcionalidade do solo (Oliveira et al., 2021; Rodrigues et al., 2022).

A continuidade do monitoramento dessa atividade contribui para o desenvolvimento de práticas agrícolas que promovam a saúde do solo, a conservação da matéria orgânica e a sustentabilidade dos sistemas produtivos, sendo indispensável na gestão ambiental moderna (Silva et al., 2021).

2.8.2.10 Quociente metabólico do solo (qCO_2)

O quociente metabólico do solo (qCO_2) corresponde à relação entre a respiração basal e o carbono da biomassa microbiana (CBM), expressando a quantidade de CO_2 liberada por unidade de biomassa microbiana em determinado intervalo de tempo. Esse índice é amplamente utilizado para avaliar a eficiência metabólica da microbiota na utilização do carbono e a intensidade das perdas de carbono nos compartimentos orgânicos do solo (Chen et al., 2021a; Liu et al., 2024).

O qCO_2 é considerado um indicador sensível da qualidade biológica do solo, pois reflete o grau de eficiência com que a biomassa microbiana converte substrato em crescimento celular. Valores elevados geralmente indicam maior gasto energético para manutenção metabólica, sugerindo ambientes submetidos a estresse ou distúrbios, enquanto valores menores estão associados a sistemas mais equilibrados e eficientes (Martins et al., 2023; Wang et al., 2023b).

A utilização do qCO_2 como indicador baseia-se na interpretação ecológica da respiração da comunidade microbiana, segundo a qual incrementos na emissão de CO_2 podem representar respostas iniciais a condições de estresse, resultando em redirecionamento energético para processos de manutenção celular em detrimento do crescimento e da síntese de biomassa (Santos et al., 2024a; Silva et al., 2022).

Nesse contexto, alterações provocadas pelo manejo, uso da terra, preparo do solo e disponibilidade de matéria orgânica influenciam diretamente o qCO_2 , tornando esse parâmetro útil na avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Solos sob condições de degradação tendem a apresentar maiores valores de qCO_2 , indicando menor eficiência do uso do carbono e maior dissipação energética pela microbiota (Li et al., 2020; Zhou et al., 2020b).

Por essa razão, o qCO_2 tem sido amplamente recomendado como indicador de impacto ambiental e qualidade do solo, muitas vezes apresentando maior sensibilidade que a biomassa microbiana isoladamente. Sua interpretação conjunta com CBM, respiração basal e quociente microbiano amplia a compreensão das transformações da matéria orgânica e da estabilidade funcional dos agroecossistemas (Liu et al., 2024; Paz et al., 2023).

3 JUSTIFICATIVA

A região do Oeste do Estado de São Paulo é conhecida por suas vastas áreas de solos arenosos (Latosolos, Argissolos e Neossolos Quartzarênicos), que na sua maioria estão ocupados com pastagens degradadas ou com o cultivo restrito de algumas culturas, como o amendoim e a cana-de-açúcar (esta última com médio-alto potencial produtivo para a região).

O manejo inadequado ao longo do tempo e a baixa capacidade de retenção de água e nutrientes desses solos são fatores que limitam sua produtividade e os tornam suscetíveis a processos erosivos (Cordeiro et al., 2020).

Segundo Oliveira et al. (2022a) o estabelecimento de outras culturas como o milho, soja e mesmo pastagens de alta qualidade ainda são escassos devido, principalmente, às condições edafoclimáticas que associam os solos de baixa fertilidade natural e baixo estoque de matéria orgânica do solo (MOS) ao clima quente e a má distribuição das chuvas com constantes e prolongados veranicos. A matéria orgânica do solo é um componente chave para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas de solos arenosos, mas sua manutenção é um grande desafio sob sistemas de cultivo convencionais em climas tropicais.

Definir-se estratégias de gestão e protocolos para a ocupação racional e ecossistêmica dentro dessas premissas e com estudos comparativos entre os diversos sistemas e modalidades de uso e manejo de solos sob integração lavoura-pecuária de longa duração, são escassos na literatura. No entanto, estudos recentes demonstram que sistemas integrados são uma estratégia promissora para melhorar a saúde e a capacidade produtiva de solos arenosos tropicais (Vanolli et al., 2025).

Por isso, justifica-se buscar a compreensão de como esses aspectos químicos e biológicos se correlacionam para o acréscimo de matéria orgânica e produtividades de grãos nas mesmas condições da Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP.

4 HIPÓTESES

- Os sistemas de manejo do solo promovem diferentes aportes de resíduos, alteram os teores e a labilidade do carbono orgânico do solo por meio das suas frações químicas (ácido fúlvico, ácido húmico e humina), bem como faz ter acréscimo na atividade enzimática da microbiota do solo;
- Existe correlação entre os teores de carbono nas frações facilmente oxidáveis, não-humificadas com a atividade enzimática da biomassa microbiana do solo, bem como há correlação entre elas e os diferentes sistemas de manejo do uso do solo;

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo Geral

- Avaliar a influência do Sistema de Manejo do Solo com a sucessão soja-milheto/sorgo, sob o enfoque de 5 manejos a saber: CulturalLP, PastoLP, Pasto, Pivô, Floresta) nos teores de carbono de frações lábeis e humificadas da matéria orgânica do solo e na atividade enzimática relacionada ao ciclo do carbono.

5.2 Objetivos Específicos

- Avaliar se os 5 manejos adotados apresentam efeitos nas frações químicas lábeis e humificadas do carbono orgânico do solo;
- Avaliar se os 5 manejos adotados apresentam efeitos na ação enzimática presente no solo.
- Avaliar se há correlação das frações lábeis do carbono orgânico juntamente com a atividade enzimática do solo com os 5 diferentes tipos de Manejo do Solo propostos nesta pesquisa.

6 METODOLOGIA E ANÁLISE DE DADOS

6.1 Área De Estudo

A área de estudo está situada na Fazenda Ybyeté Porã situada no Município de Rancharia a 70 km de Presidente Prudente, região Oeste do Estado de São Paulo, localizada a 22° 09' 13"S de latitude, 50° 48'59"W de longitude e 514 m de altitude média. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, a região Oeste do Estado de São Paulo apresenta predominância do clima do tipo Cwa, caracterizado como subtropical úmido com inverno seco e verão quente e chuvoso. Esse padrão climático é marcado pela concentração das precipitações no período de primavera-verão e redução acentuada das chuvas no inverno, influenciando diretamente a dinâmica hídrica, o desenvolvimento da vegetação e os sistemas de produção agrícola da região (Aparecido et al., 2020; Teixeira, 2022) (Tabela 1).

Na área experimental predominam Argissolo desenvolvidos a partir de sedimentos do Grupo Bauru, especialmente da Formação Vale do Rio do Peixe, material de origem que influencia atributos como textura, profundidade efetiva, drenagem e susceptibilidade à erosão, características relevantes para a dinâmica físico-química em sistemas agrícolas do oeste paulista (Stradioto et al., 2020), que há aproximadamente 20 anos estão sendo manejados no sistema de Integração Lavoura-Pecuária com Plantio Direto.

Tabela 1: Resumo climatológico de maio de 2021 a abril de 2023 em Rancharia/SP.

	2021/22			2022/23		
	Mai-Set 2021	Out/21 - Abr/22	Mai/21 - Abr/22	Mai-Set 2022	Out/22 - Abr/23	Mai/22 - Abr/23
P (mm)	150,3	875,7	1026,0	153,0	1097,0	1250,0
Tméd (°C)	21,1	25,3	23,6	20,0	23,8	22,2
Tmáx (°C)	29,1	31,3	30,4	27,4	28,9	28,3
Tmín (°C)	14,6	19,8	17,6	14,0	19,0	16,9
Rad (MJ m ⁻²)	16,2	21,6	19,3	15,0	20,5	18,2
Déf (mm)	-201	-115	-316	-34	-25	-59
Exc (mm)	0	64	64	60	374	434

Obs.: Precipitação (P, mm), Temperatura média (Tméd, °C), máxima (Tmáx, °C) e mínima (Tmín, °C) do ar; Radiação Solar (MJ m⁻²); Déficit hídrico (mm); Excesso hídrico (mm). Fonte: Barbosa e Cunha, 2025 (dados não publicados).

6.2 Sistemas de Manejo

A fazenda é atualmente subdividida em talhões de aproximadamente 70 hectares cada e desta forma foram selecionados para esse estudo dois talhões, sendo um com CulturalLP e o outro com PastoLP. Além dessas duas áreas, foram avaliadas outras três, sendo uma ocupada com Pasto, outra com Pivô e outra com Floresta.

A discriminação de cada manejo é apresentada de acordo com seu histórico de uso dos últimos 4 anos, 2020, 2021, 2022 e 2023, a saber:

6.2.1 Pasto

- 2020/2021: As espécies forrageiras implantadas que compuseram o sistema incluem *Brachiaria decumbens* (*Urochloa* spp.) e Tanzânia (*Megathyrsus maximus*), semeadas no período de safra e pastejadas por bovinos de diferentes categorias animais durante os dois anos.
- 2022/2023: As pastagens dos dois anos anteriores são dessecadas no período que antecede o plantio da cultura de safra. Plantou-se a soja como cultura principal que foi colhida e após, em período de safrinha, plantou-se o milho simultaneamente com a *Brachiaria decumbens*. Nesses dois anos essas áreas não foram pastejadas por bovinos.

6.2.2 PastoLP

- 2020/2021: Adotou-se o dessecamento da área e plantou-se soja em período de safra. Após a colheita da soja foi semeado o milho simultaneamente com a *Urochloa decumbens*. Após a colheita do milho a área foi destinada para o pastejo de bovinos.
- 2022/2023: Nesta área que nos dois anos anteriores foi manejada com culturas anuais, implantou-se única e exclusivamente pastagens de *Urochloa decumbens* e foram destinadas ao pastejo de bovinos.

6.2.3 CulturalLP

- 2020/2021: Área implantada única e exclusivamente com pastagens de *Urochloa decumbens* e foram destinadas ao pastejo de bovinos.
- 2022/2023: Dessecou-se a área e plantou-se soja em período de safra. Após a colheita da soja foi semeado o milho simultaneamente com a *Brachiaria decumbens* (*Urochloa* spp.). Após a colheita do milho a área foi destinada para o pastejo de bovinos.

6.2.4 Pivô

- 2020/2021: Pastagem de *Brachiária decumbens* (*Urochloa* spp.) e/ou Tanzânia (*Megathyrus maximus*), semeadas no período de safra, irrigadas e pastejadas por bovinos de diferentes categorias animais durante os dois anos.
- 2022/2023: Dessecou-se a área e plantou-se soja em período de safra. Após a colheita da soja foi semeado o milho simultaneamente com a *Brachiaria decumbens* (*Urochloa* spp.). Houve a aplicação de lâmina de água em períodos de veranico. Após a colheita do milho a área foi destinada para o pastejo de bovinos, podendo ser irrigada se houvesse demanda.

6.2.5 Floresta

- 2020/2021 e 2022/2023: Área de vegetação natural secundária, sem ação antrópica.

Assim, este trabalho de tese foi embasado nos resultados dos dados coletados de cinco áreas com características de solo e clima semelhantes, tendo o sistema de cultivo como a principal diferença entre elas. Em cada uma das áreas de estudo foram realizadas avaliações de indicadores da qualidade por meio do fracionamento químico da matéria orgânica e microbiológica do solo dos 5 Manejos.

A análise do solo das áreas avaliadas está especificado de acordo com o descrito na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2: Análise do solo. Fazenda Ybyeté Porã, Rancheira-SP para o ano de 2022.

Sistemas de Uso do Solo	CulturalLP	Pasto	PastolLP	Pivô	Floresta
0-10 cm					
pH	4,92	6,03	4,56	5,76	4,23
M.O.	16,6	23,7	17,8	14,5	19,4
P	19,3	68,6	34,6	34,3	6,10
S-SO ₄ ²⁻	5,98	7,47	6	9,22	5,23
Al ³⁺	1,77	3,64	1,82	0	16,3
H-Al	17,5	12,2	21,4	12,6	31,2
K	2,77	2,63	2,73	2,57	1,43
Ca	12,4	59,63	15,1	21	7,2
Mg	7,75	9,3	3,20	1,06	6,37
SB	22	71,6	21	31,7	15,7
CTC	40,4	83,8	42,4	44,3	47,08
M	9,56	0,0	8,97	0	16,3
V	54,7	83,6	48,3	71,4	33,0
10-20 cm					
pH	4,63	5,35	4,31	5,34	3,90
M.O.	14	15,5	14,7	14	14,8
P	16,46	10,81	26,25	31,54	5,66
S-SO ₄ ²⁻	5,36	4,55	5,46	5,69	3,95
Al ³⁺	2,60	0,12	2,35	0,51	6,70
H-Al	19,20	14,7	21,7	15,1	37,7
K	2,69	2,33	1,75	2,12	1,15
Ca	6,67	15,07	8,39	11,67	2,68
Mg	5,99	5,89	4,72	6,34	2,14
SB	12,71	22,69	11,85	26,10	5,95
CTC	32,0	37,3	33,6	41,2	43,6
m	17,84	0,59	16,23	3,43	53,57
V	40,1	60,2	35,2	60,5	13,6

Obs.: pH - Potencial Hidrogeniônico (adimensional); M.O. - Matéria Orgânica (g dm^{-3}); P - Fósforo (mg dm^{-3}); S-SO₄²⁻ - Enxofre na forma de Sulfato (mg dm^{-3}); Al³⁺ - Alumínio Trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); H-Al - Acidez Potencial (Hidrogênio + Alumínio) ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); K - Potássio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Ca - Cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Mg - Magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); SB - Soma de Bases ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); CTC - Capacidade de Troca de Cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); m - Saturação por Alumínio (%); V - Saturação por Bases (%). Fonte: Silva (2024).

6.3 Etapas de trabalho

Para uma melhor compreensão da proposta apresentada no presente projeto, os procedimentos metodológicos foram subdivididos em quatro fases: 1) reconhecimento prévio das áreas de estudo; 2) trabalhos de campo; 3) trabalhos de laboratório; e 4) análises dos dados.

6.3.1 Reconhecimento prévio da área de estudo

O reconhecimento prévio das áreas de estudo foi efetuado através de caracterização de campo dos solos por meio de análises de fertilidade e classificação de solos das 5 áreas em estudo da Fazenda Ybyeté Porã (Silva et al., 2024a).

Os trabalhos de campo foram compostos de 8 (oito) amostragens por área nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, totalizando 120 amostras. Nestas amostras de solo foram feitas as análises microbiológicas (40) na profundidade de 0,0-0,10 m e o fracionamento químico da matéria orgânica do solo (80) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, compreendidos em dois anos de estudos (2022 e 2023).

As atividades de laboratório foram compostas por amostras de solo da camada de 0,0-0,10 m para a microbiologia com a caracterização das atividades enzimáticas do carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), fluoresceína diacetato (FDA), desidrogenase (DESID), glicosidase (GLICO), arilsulfatase (ARIL) e fosfatase (FOS), bem como por amostras nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m para avaliação do fracionamento químico da matéria orgânica (ácido fúlvico, ácido húmico e humina) das 5 áreas.

6.3.2 Trabalhos de campo

Uma vez caracterizadas as áreas de estudo foram então definidos os locais para alocação dos pontos onde foram efetuadas as coletas de solos.

Foram coletadas 8 amostras de solo de aproximadamente 300 gramas em cada área dos Manejos, sendo 40 amostras à profundidades de 0-0,10 m para as análises microbiológicas (enzimas) e outras 80 amostras de 0,0-0,10 m (40) e 0,10-0,20 m (40), para o procedimento das análises da matéria orgânica do solo através do seu fracionamento químico. As amostras de solos foram coletadas durante os meses de maio de 2022 e maio de 2023.

6.3.3 Trabalhos de Laboratório

6.3.3.1 Fracionamento Químico da Matéria Orgânica do Solo (MOS)

As amostras coletadas (tradagens) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m foram encaminhadas para análise dos teores de carbono das frações húmicas que incluem as frações de ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e a humina (240 análises). As análises de fertilidade do solo foram realizadas de acordo com os padrões do Estado de São Paulo (Rajj et al., 2001), na Embrapa Solos.

A metodologia utilizada para proceder-se ao fracionamento químico da matéria orgânica foi adaptada de Swift (1996) e encontra-se rigorosamente descrita no Santos et al. (2022) ao final da tese.

Schnitzer (1972) estabeleceram fundamentos importantes para o entendimento e a metodologia de extração das substâncias húmicas, ressaltando que a fração húmica pode ser dividida em ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina, cada qual com características singulares de solubilidade e comportamento químico. A extração dessas frações é fundamental para estudos que visam compreender o papel funcional das substâncias húmicas dos solos e sua influência na sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

O processo clássico de extração das SH envolve o uso de soluções alcalinas, geralmente hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), sob condições controladas de tempo, temperatura e atmosfera inerte, conforme recomendado pela International Humic Substances Society (IHSS). Schnitzer (1972) destacaram que a alcalinidade promove a solubilização das frações húmicas, possibilitando a separação das frações solúveis (ácidos fúlvicos e húmicos) da humina, que é insolúvel em soluções alcalinas e ácidas.

Swift (1996) enfatiza que o procedimento de extração deve considerar o tipo de solo e o grau de humificação da matéria orgânica, pois variáveis como tempo de extração, concentração do extrator e relação solo/extrator podem afetar significativamente o rendimento e a qualidade das SH extraídas. Além disso, a despolimerização da humina tem sido objeto de estudo para ampliar a eficiência deste processo, buscando extrair frações inicialmente insolúveis, o que pode fornecer melhor compreensão da dinâmica da matéria orgânica no solo.

A padronização dos procedimentos de extração, conforme sugerido pela IHSS, busca garantir a comparabilidade dos dados entre estudos e laboratórios. Isso inclui o tempo de extração recomendado em torno de quatro horas, sob agitação mecânica e atmosfera de nitrogênio, visando minimizar a oxidação e alterar minimamente a estrutura das substâncias húmicas. Swift (1996) destaca que práticas padronizadas fornecem bases sólidas para a avaliação e interpretação dos resultados em pesquisas científicas sobre solos.

Finalmente, a compreensão detalhada das substâncias húmicas e aprimoramento das técnicas de extração são indispensáveis para o avanço dos estudos em química do solo, manejo sustentável e recuperação de áreas degradadas. Os trabalhos de Swift (1996) e Schnitzer (1972) oferecem alicerces fundamentais para a normalização e evolução das metodologias neste campo, contribuindo para o conhecimento da matéria orgânica e sua função primordial nos ecossistemas terrestres.

6.3.3.2 Análises Microbiológicas do Solo

Os parâmetros microbiológicos foram analisados para as amostras coletadas na camada de 0-10 cm via tradagens (40 amostras para cada parâmetro), e correspondem a respiração basal do solo, análise de carbono da biomassa microbiana (CBM) e nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), quociente metabólico (qCO_2), atividade enzimática da desidrogenase (DESI), atividade da fosfatase, atividade da β -glicosidase, atividade da arilsulfatase e FDA.

6.3.3.3 Análise da respiração do solo

A respiração do solo foi avaliada como descrito por Alef (1995), sendo utilizadas amostras de 50g de solo que serão homogeneizadas e mantidas dentro de frascos herméticos. Sobre a superfície do solo, em cada frasco será colocado um Becker de 50 mL, contendo 40 mL de solução de NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$.

Os frascos foram incubados pelo período de 24 horas. Para avaliar a retenção de CO_2 na solução, foi utilizado o método condutimétrico (Rodella et al., 1999) com leitura de condutividade na solução de NaOH após 24 horas, empregando-se um condutímetro HI99301 (Hanna instruments).

A quantidade de CO₂ produzida pela respiração foi calculada utilizando-se fórmula definida por Rodella et al. (1999) e os resultados foram expressos em mg de C-CO₂ g⁻¹ h⁻¹.

6.3.3.4 Análise do carbono e nitrogênio da biomassa microbiana

A análise de biomassa microbiana do solo - BMS foi realizada em duplicata, utilizando a metodologia descrita por Ferreira et al. (1999), onde o solo será seco em estufa com ventilação a 30° C por 24 horas, e depois peneirado em malha de 2,0 mm. Na etapa seguinte, duas amostras de 50 g de cada tratamento foram pesadas em erlenmeyer de 250 mL e reumedecidas com 3 mL de água destilada para atingir aproximadamente 25% da capacidade de campo de um solo arenoso (Reichardt, 1988), agitadas para uniformizar a distribuição da umidade e colocada 1 amostra de cada tratamento para irradiar no micro-ondas por um tempo que foi determinado pela seguinte fórmula:

$$P = \frac{(r \cdot mt)}{T}$$

Onde, T = refere-se ao tempo real de exposição das amostras ao micro-ondas; R = 800J g⁻¹ de solo, quantidade de energia necessária para exposição; mt = a massa total das amostras a serem irradiadas em gramas; e P = potência real do aparelho em W.

A potência real do aparelho será calculada pela seguinte fórmula:

$$P = \frac{(Cp \cdot K \cdot \Delta t \cdot m)}{T}$$

Onde, P refere-se à potência real do aparelho em W; Cp = 1 J ml⁻¹ °K⁻¹, capacidade da água de receber calor; K = 4,184, fator de correção de cal m⁻¹ °K⁻¹ para watts (J s⁻¹); Δt = variação de temperatura em °C de 1 L de água em 2 minutos de exposição; m = 1000 g, massa da água em gramas; e t = 120 s, tempo de exposição da água ao microondas.

As amostras irradiadas e não irradiadas foram submetidas à extração com 50 mL de sulfato de potássio - K₂SO₄ (0,5 mol L⁻¹) por 30 minutos, em agitador rotatório circular, deixadas decantar e filtradas em papel tipo faixa azul de filtração

lenta.

A determinação do carbono nos extratos irradiados e não irradiados foi realizada utilizando 10 mL do extrato, oriundo dos 50 mL após filtração, e adicionando em seguida 2 mL de $K_2Cr_2O_7$ ($0,066 \text{ mol L}^{-1}$), 10 mL de H_2SO_4 concentrado e 5 mL de H_3PO_4 concentrado. Após o resfriamento foi adicionada 50 mL de água destilada. A titulação ocorreu com a utilização do sulfato ferroso amoniacal ($0,04 \text{ mol L}^{-1}$) com fenilalanina como indicador.

O C extraído do solo foi calculado pela fórmula:

$$C \text{ (mg Kg}^{-1}\text{)} = \frac{((V_b - V_a) \cdot N \cdot 1000 \cdot V_{extrator})}{(\text{volume do extrato} \cdot MSS)}$$

Onde, C refere-se ao carbono extraído do solo; V_b é o volume (mL) do $(NH_4)_2 Fe(SO_4)_2$ gasto na titulação do branco; V_a é o volume (mL) do $(NH_4)_2 Fe(SO_4)_2$ gasto na titulação da amostra; N é a normalidade exata do $(NH_4)_2 Fe(SO_4)_2$, $N = 0,677$; $V_{extrator}$ é o volume de K_2SO_4 utilizado na extração = 50 mL; $V_{extrato}$ é o Volume de K_2SO_4 utilizado para análise = 10 mL; e MSS é a massa do solo seco em gramas = 50 g.

O C_{mic} é calculado pela equação:

$$C_{mic} \text{ (mg Kg}^{-1}\text{)} = \frac{(CI - CNI)}{K_{ec}}$$

Onde, CI refere-se ao carbono extraído do solo irradiado; CNI ao carbono extraído do solo não irradiado; K_{ec} é a proporção total do carbono microbiano extraído após irradiação = 0,21 (Frighetto, 2000).

O fator de correção K_{ec} citados na literatura é variável (0,21 a 0,45), não havendo um consenso a respeito do valor que foi utilizado. Neste trabalho foi adotado o valor de 0,21 (Frighetto, 2000).

O nitrogênio da biomassa microbiana (N_{mic}) foi determinado de acordo com a metodologia descrita por (Joergensen et al., 1990). Para proceder esta análise foi utilizado o mesmo extrato do C_{mic} , a partir de 0,6 mL do extrato adicionado a um tubo de ensaio. Junto ao extrato será adicionado 1,4 mL de ácido cítrico ($0,2 \text{ mol L}^{-1}$) a pH 5,0 e 1 mL do reagente ninidrina. Os tubos foram incubados à $100 \text{ }^\circ\text{C}$, em banho-maria, por 25 minutos. Após esfriamento,

foram adicionados 4 mL da mistura etanol:água (1:1), para posterior leitura no espectrofotômetro a 570 nm.

6.3.3.5 Quociente metabólico (qCO_2)

O quociente metabólico é a razão entre o C-CO₂ liberado pela respiração do solo pelo C na biomassa microbiana, expresso em mg C-CO₂ g⁻¹ BMS - C h⁻¹ (Anderson et al., 1993).

6.3.3.6 Análise da atividade da enzima desidrogenase

A atividade da enzima desidrogenase, estimada segundo Van Os et al. (2001), foram realizadas em triplicatas, a partir de 5 g de solo de cada amostra acondicionadas em tubos de ensaio. Posteriormente, foram adicionados 2 mL da solução T.T.C a 1%, juntamente com 1 mL de glicose a 0,1%. Na amostra branco serão adicionadas 1 mL de glicose a 0,1% e 2 mL da solução tampão tris a 0,1 M (pH = 7,6). As amostras foram misturadas em agitador tipo VORTEX e incubadas em tubo de ensaio a 30 °C por 18 h. Após a incubação, foram adicionados 9 mL de metanol em todas as amostras, e logo em seguida filtradas para a realização da leitura no espectrofotômetro em 530 nm. Os resultados foram ajustados em curva padrão e expressos na forma de concentração de TTF - formazan (ug.g⁻¹).

6.3.3.7 Análise da atividade das enzimas fosfatases ácidas e alcalinas

A determinação da atividade das fosfatases ácida e alcalina foi efetuada de acordo com o método preconizado por Alef (1995). O método fundamenta-se na análise da concentração de p-nitrofenol resultante da hidrólise enzimática de p-nitrofenil fosfato. Em 0,15 g de solo foram adicionados tampão pH 6,5 para análise da fosfatase ácida e tampão pH 11,0 para análise da fosfatase.

Para ambas as enzimas, foram adicionados 0,12 mL de p-nitrofenil fosfato 0,05 M com vigorosa homogeneização e posterior incubação durante 1 hora a 37°C.

Posteriormente, em cada amostra foram adicionados 0,5 mL da solução de reagentes para colorimetria foram centrifugadas a 8.000 g por 5 minutos e

as leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 400 nm. A concentração de p-nitrofenol presente em cada amostra foi determinada com base na curva padrão (0;2;5;7,5;10 g de p-nitrofenol/mL).

6.3.3.8 Análise da atividade da enzima da β -glicosidase

A atividade de β -glicosidase foi descrita segundo a metodologia proposta por Tabatabai (1994). Em erlenmeyers foram misturados, por agitação, 1 g de solo, 4 mL do tampão MUB pH 6 e 1 mL da solução PNG. Os tubos foram tampados e colocados em banho-maria a 37^o C por 1 hora. Depois, foram adicionados 1 mL de CaCl₂ 0,5 M e 4 mL de THAM 0,1M pH 12, seguido de agitação. O meio foi filtrado em papel filtro com auxílio de um funil de vidro, e a quantidade p-Nitrofenol (pNP) presente no filtrado determinada a intensidade da cor amarela no espectrofotômetro a 420 nm.

6.3.3.9 Análise da atividade da enzima arilsulfatase

A atividade da arilsulfatase foi determinada segundo a metodologia proposta por Tabatabai et al. (1970). Em erlenmeyers de 50 mL foram adicionados 1 g de solo, 4 mL de tampão acetato de sódio pH 5,8 e 1 mL de solução de PNS 50 mM preparada no tampão. Os frascos foram fechados, agitados manualmente e incubados na incubadora por 1 h a 37°C. Após este período, foram imediatamente adicionados 1 mL de CaCl₂ 0,5 M e 4 mL de NaOH 0,5 M seguido de agitação. O meio reacional será filtrado em papel de filtro qualitativo e a quantidade de p-nitrofenol presente no filtrado, determinada colorimetricamente a 410 nm, após o preparo das curvas padrão de p-nitrofenol.

6.3.3.10 Método de hidrólise do diacetato de fluoresceína - FDA

A atividade hidrolítica do FDA foi estimada segundo Swisher (1980). Amostras de 5 g de solo foram transferidas para erlenmeyer (125 mL) juntamente com 20 mL de tampão fosfato de potássio pH 7,6 e 0,2 mL de solução estoque de FDA (2 mg mL⁻¹ acetona). A reação foi interrompida pela adição de 20 mL de acetona após incubação a 25°C por 20 minutos) sob agitação (150 rpm), as

suspensões de solo foram filtradas e a leitura realizada em espectrofotômetro a 490 nm.

6.4 Estimativa Eficiência de Uso de Água Disponível (EUAD)

A Eficiência de Uso da Água Disponível (EUAD) é razão entre parâmetros microbiológicos/biogeoquímicos e a Água Disponível (AD), índice utilizado no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) na Instrução Normativa do Ministério da Agricultura e Pecuária, MAPA nº 1 (BRASIL, 2022).

Água Disponível (AD)

$$AD = \left\{ \left[1 + \left(0,3591 \cdot (-0,02128887 \cdot AT - 0,01005814 \cdot SIL - 0,01901894 \cdot ARG + 0,0001171219 \cdot AT \cdot SIL + 0,0002073924 \cdot AT \cdot ARG + 0,00006118707 \cdot SIL \cdot ARG - 0,000006373789 \cdot AT \cdot SIL \cdot ARG) \right) \right]^{2,78474} \right\} \cdot 10$$

Onde: AD = mm de H₂O/cm de solo; AT = Areia Total (%); ARG = Argila (%); SIL = Silte (%); medidos na camada de 0 a 40 cm de profundidade.

Nesse sentido a EUAD seria:

$$EUAD = \frac{X}{AD}$$

Onde: EUAD = X (Qualquer Parâmetro) / (mm de H₂O/cm de Solo); AT = Areia Total (%); ARG = Argila (%); SIL = Silte (%); medidos na camada de 0 a 40 cm de profundidade.

Nesse sentido a EUAD surge como proposta de normalizar, neste caso, a resposta biológica do solo pela capacidade do reservatório hídrico potencial controlado pela textura, especialmente em ambientes arenosos, nos quais a limitação hídrica é estrutural (baixa microporosidade e menor retenção) e tende a intensificar oscilações de umidade e estresse microbiano. Dessa forma o EUAD é particularmente útil para comparar solos e manejos com texturas contrastantes e, ao mesmo tempo, evitar interpretações que confundam alto valor absoluto com maior eficiência quando o solo simplesmente tem maior capacidade física de reter

água.

A Tabela 3 mostra a media geral das texturas e os resultados de água disponível (AD), (classe-Zarc) e EUA da água disponível aplicado ao parâmetro Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) para os manejos estudados.

Tabela 3: Parâmetros físicos, microbiológicos do solo e EUAD. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.

Parâmetros	CulturalLP	Pasto	PastoLP	Pivô	Floresta
Argila	7,96	7,78	7,65	7,53	11,01
Silte	8,84	12,62	9,75	9,37	11,29
Areia	83,20	79,60	82,60	83,10	77,70
AD	0,52	0,61	0,54	0,52	0,63
Classe-ZARC	AD2	AD2/AD3	AD2	AD2	AD3
CBM	89,00	166,03	119,25	95,64	166,79
EUAD	146,89	274,01	196,81	157,84	275,28

Obs.: Argila, Silte e Areia (%); AD - Água Disponível (cm mm^{-1}); CBM - Carbono da Biomassa Microbiana (mg C g^{-1} de solo); EUAD - Eficiência de Água Disponível ($(\text{mg C g}^{-1})/(\text{cm mm}^{-1})$) aplicada ao parâmetro CBM; Classe de Água Disponível (ZARC - Zoneamento Agrícola de Risco Climático), indicando maiores valores com menor probabilidade de risco climático.

6.5 Estatísticas

Para validação dos pressupostos de análise de variância os dados foram submetidos a testes de homoscedasticidade de Levene e Normalidade de Kolmogorov.

Atendidos os pressupostos anteriores os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F (Fisher) e os tratamentos com resultados significativos foram submetidos a testes de *post hoc*, mediante análise de comparação de médias, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software SISVAR (Ferreira, 2019), R (R Core Team, 2025; RStudio Team, 2025) e Python (Microsoft, 2023; Van Rossum and Drake, 2023).

Também foram realizadas Análises de Componentes Principais (PCA's) no intuito de detectar covariáveis que não foram objetivo direto do trabalho, mas que tinham potencial de explicar melhor outras dimensões (químicas, físicas) além das biológicas e, conseqüentemente, interpretar melhor os resultados de

alguns dos parâmetros avaliados dentro de uma perspectiva mais abrangente dos sistemas avaliados.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Resultados do fracionamento químico da MOS

7.1.1 Análise de variância (Anova)

Os resultados da ANOVA apresentados Tabela 4 referentes aos resultados das análises microbiológicas dos anos de 2022 e 2023, respectivamente, permitem avaliar o comportamento das variáveis microbiológicas nos diferentes sistemas de uso do solo avaliados neste trabalho - Pasto, PastoILP, CulturalILP, Pivô e Floresta.

De acordo com a ANOVA os parâmetros ácido fúlvico, ácido húmico e humina no ano 2022 e a humina (com seus desdobramentos com a profundidade) no ano de 2023 apresentaram efeitos significativos a 5% de probabilidade justificando, portanto, os desdobramentos dos dados no teste de post hoc para análise de comparação de médias.

Tabela 4: Valores de testes de hipóteses ($F < Pr$) para cada parâmetro da fração química da matéria orgânica avaliado em cada profundidade. Fazenda Ybyeté Porã, Rانcharia-SP para os anos de 2022 e 2023.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
2022					
Ácido Fúlvico					
TRATAMENTO	4	61,093077	15,273269	13,135	0,0000*
PROF	1	0,269194	0,269194	0,232	0,6356
TRATAMENTO*PROF	4	0,789604	0,197401	0,17	0,9513
Ácido Húmico					
TRATAMENTO	4	5,236518	1,30913	5,376	0,0042*
PROF	1	0,690963	0,690963	2,837	0,1076
TRATAMENTO*PROF	4	2,273352	0,568338	2,334	0,0908
Humina					
TRATAMENTO	4	31,228993	7,807248	6,575	0,0015*
PROF	1	17,018403	17,018403	14,332	0,0012*
TRATAMENTO*PROF	4	13,78863	3,447157	2,903	0,0480*
2023					
Ácido Fúlvico					
TRATAMENTO	4	13,51232	3,37808	1,654	0,1706
PROF	1	0,414403	0,414403	0,203	0,6538
TRATAMENTO*PROF	4	5,170865	1,292716	0,633	0,6407
Ácido Húmico					
TRATAMENTO	4	16,589324	4,147331	1,708	0,1579
PROF	1	4,711001	4,711001	1,941	0,168
TRATAMENTO*PROF	4	23,082663	5,770666	2,377	0,0601
Humina					
TRATAMENTO	4	39,918114	9,979529	6,353	0,0002*
PROF	1	27,342093	27,342093	17,406	0,0001*
TRATAMENTO*PROF	4	21,833558	5,45839	3,475	0,0120*

Obs.: GL - Graus de Liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Fc = F calculado; PrF = Probabilidade. F significativo para o teste Tukey a 5% de probabilidade. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Gomogorov, que não apresentou significância estatística ($p > 0,05$). Dessa forma, aceitou-se a hipótese nula, concluindo-se que os resíduos seguem distribuição normal. A homogeneidade das variâncias entre os tratamentos foi verificada pelo teste de Levene, cujo resultado também não foi significativo ($p > 0,05$), indicando que as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

7.1.2 Fração ácido fúlvico

Com base nos dados experimentais coletados no Oeste Paulista para os anos de 2022 e 2023, a amplitude de variação do AF nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo foi de 0,87 a 4,30 g kg⁻¹, representando uma variação

considerável entre os tratamentos avaliados.

Os menores valores foram observados em sistemas com maior perturbação do solo ou menor aporte orgânico, como PastoILP ($0,87 \text{ g kg}^{-1}$) e Floresta ($1,01 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto os maiores valores ocorreram em sistemas com manejo menos intensivo e maior aporte contínuo de biomassa, como Pasto ($4,30 \text{ g kg}^{-1}$) e Pivô ($3,89 \text{ g kg}^{-1}$).

Essa amplitude de variação de aproximadamente $3,43 \text{ g kg}^{-1}$ reflete a sensibilidade do ácido fúlvico às mudanças nos sistemas de uso do solo. Conforme demonstrado por Mendes (2025), em regiões tropicais, em geral os solos mais arenosos apresentam maiores relações AH/AF indicando a perda seletiva da fração mais solúvel (FAF), o que explica parcialmente a variabilidade observada no Oeste Paulista, região com predominância de solos arenosos. Estudos da Embrapa (Embrapa, 2020) confirmam que solos de textura mais argilosa foram os que apresentaram os mais elevados conteúdos de carbono, especialmente na forma da fração ácido fúlvico (FAF).

O sistema de manejo é um dos principais determinantes da concentração de AF. Segundo Mendes (2025), pastagens bem manejadas apresentaram as maiores concentrações ($4,30 \text{ g kg}^{-1}$), explicado porque a constante renovação do sistema radicular e a deposição de resíduos aéreos e excrementos animais promovem um aporte contínuo de material orgânico de fácil decomposição, favorecendo a formação da fração AF.

Em contraste, sistemas com revolvimento intensivo do solo, como a agricultura convencional, resultam em menor acúmulo dessa fração lábil.

A integração lavoura-pecuária (ILP) apresentou resultados intermediários, com o CulturalILP registrando $2,06 \text{ g kg}^{-1}$ e o PastoILP apenas $0,87 \text{ g kg}^{-1}$. Segundo Carneiro et al. (2022), essa redução no PastoILP em relação ao Pasto puro sugere que a introdução da fase de lavoura e o consequente revolvimento do solo ou a colheita de biomassa alteram a dinâmica da MOS, resultando em menor acúmulo da fração lábil.

Sistemas como a Floresta, apesar de sua alta estabilidade, apresentaram baixas concentrações de ácido fúlvico ($1,01 \text{ g kg}^{-1}$). De acordo com (Carneiro et al., 2022), isso ocorre porque a natureza mais recalcitrante da matéria orgânica

florestal tende a formar frações mais estáveis, como o ácido húmico e a humina, em detrimento do ácido fúlvico.

Conforme destaca Reis et al. (2026), a presença da fração ácido húmico tem sido relacionada a solos férteis, com alto conteúdo de bases trocáveis, demonstrando que a qualidade da matéria orgânica influencia diretamente na proporção de ácido fúlvico. Estudos de Coutinho et al. (2020) indicam que solos sob Floresta Atlântica apresentaram maior proporção ácido húmico/ácido fúlvico, sendo, juntamente com as classes de agregados abaixo de 2,0 mm os atributos mais influenciados pelas formas de uso e/ou cobertura vegetal.

As condições climáticas exercem influência significativa sobre a formação e mobilidade da fração ácido fúlvico. No Oeste Paulista, durante 2022 e 2023, a precipitação acumulada foi de 1250 mm com temperaturas médias de 22,2°C, criando condições favoráveis à decomposição microbiana e à mobilização do AF.

Segundo Mendes (2025), a alta umidade e as temperaturas amenas promovem a atividade microbiana, acelerando os processos de humificação e a liberação de ácido fúlvico no solo.

Em 2023, a ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos ($p > 0,05$) pode ter sido atribuída às condições climáticas uniformes, que estimularam a atividade biológica em todos os sistemas. O excesso hídrico registrado em 2023 (434 mm) favoreceu a decomposição, resultando em maior mobilidade da fração ácido fúlvico.

Conforme afirmam Mendes (2025), a alta concentração de AF está intimamente ligada à recente adição de resíduos vegetais e à intensa atividade microbiana. No sistema Pivô, a irrigação controlada mantém condições ideais de umidade e temperatura, acelerando os processos de humificação e a liberação de ácido fúlvico no solo, e isso pode ter feito com que o turnover contínuo de biomassa em sistemas como pastagens intensivas e áreas irrigadas resulta em maior formação da fração ácido fúlvico.

Outro fator importante a ser considerado é que a distribuição vertical da fração AF varia conforme o sistema de manejo. Sistemas com aporte superficial de resíduos orgânicos, como Pasto e CulturalLP, apresentaram redução significativa do AF com o aumento da profundidade, caracterizando uma concentração

preferencial na camada superficial. Já sistemas como Floresta e Pivô mostraram distribuição mais homogênea, diferentemente do que ocorre em sistemas de cultivos que tendem a apresentar variações em função dos diferentes tipos de uso da terra (Zhao et al., 2024).

Os ácidos fúlvicos apresentam características de solubilidade e mobilidade distintas conforme a textura do solo. De acordo com a Embrapa (2020) a presença de argilominerais no solo parece estar favorecendo a fixação dos compostos orgânicos solúveis e contribuindo para o aumento da fração ácido fúlvico. No Oeste Paulista, região predominantemente com solos arenosos, segundo dados compilados pela Embrapa, a maior solubilidade e menor tamanho molecular dos ácidos fúlvicos resultam em maior transporte e potencial lixiviação. Essa característica explica parcialmente as variações observadas entre os tratamentos, particularmente em períodos de alta precipitação, conforme demonstrado pelo Instituto Rodale Cagna et al. (2026).

Segundo análises conduzidas em Latossolos por Silva et al. (2024a), uma elevada proporção de AF pode indicar húmus de menor qualidade. Como bem sintetiza Ana Primavesi, conforme citado por Rigrantec (2023), a matéria orgânica se transforma em ácidos fúlvicos (por oxidação biológica).

Depois, os ácidos fúlvicos podem se transformar em ácidos húmicos (pela oxidação biológica + Ca, P, K, N). Isso demonstra que o predomínio de ácido fúlvico sugere material em estágio anterior de humificação, enquanto a presença de maiores proporções de ácidos húmicos pode indicar solos mais férteis e bem estruturados.

A concentração da fração ácido fúlvico no Oeste Paulista é determinada por uma complexa interação entre fatores edáficos, climáticos e de manejo. Segundo Alvarenga et al. (2023), sistemas com aporte contínuo de matéria orgânica e menor perturbação do solo favorecem o aumento das frações húmicas mais lábeis, especialmente os ácidos fúlvicos, devido à intensificação da atividade microbiana e da ciclagem do carbono. A monitorização dessa fração como bioindicador é essencial para avaliar a dinâmica e a sustentabilidade do carbono em diferentes manejos agrícolas, conforme confirmado por estudos recentes conduzidos na região.

Em síntese, o ácido fúlvico é a fração da matéria orgânica do solo (MOS) de menor peso molecular e maior reatividade, sendo considerado um bioindicador sensível da atividade biológica e da qualidade edáfica, refletindo a porção mais lábil e dinâmica do carbono orgânico (Paulino et al., 2023). Sua concentração está intimamente ligada à recente adição de resíduos vegetais e à intensa atividade microbiana (Azevedo et al., 2021).

A Figura 1, que apresenta a concentração de AF em diferentes sistemas de uso da terra em 2022, revela uma variação acentuada entre os tratamentos. As maiores concentrações foram observadas nos sistemas Pasto e Pivô, com valores aproximados de 4,3 e 3,9 g kg⁻¹, respectivamente, sendo o Pasto estatisticamente superior.

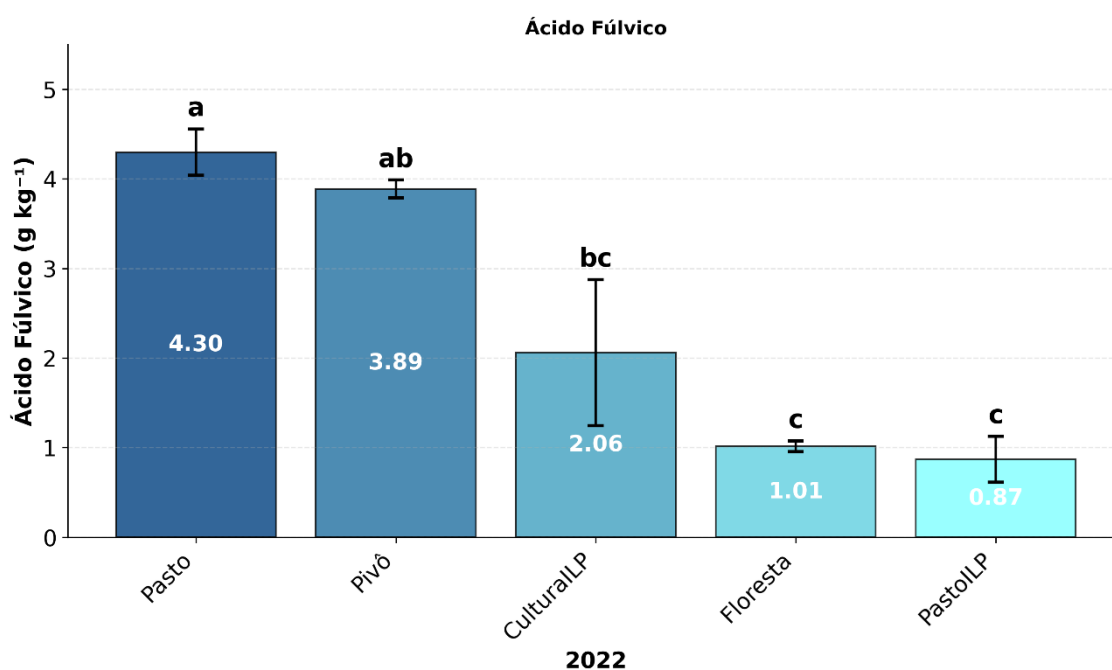
A alta concentração de AF nos sistemas Pasto e Pivô sugere um elevado turnover de biomassa e uma intensa atividade de decomposição microbiana. Em pastagens bem manejadas, a constante renovação do sistema radicular e a deposição de resíduos aéreos e excrementos animais promovem um aporte contínuo de material orgânico de fácil decomposição, favorecendo a formação da fração AF (Mendes, 2025). No sistema Pivô, a irrigação controlada e o manejo de culturas intensivas podem manter condições ideais de umidade e temperatura, acelerando os processos de humificação e a liberação de AF no solo.

Em contraste, os sistemas Floresta e PastoILP apresentaram as menores concentrações de AF, com valores de aproximadamente 1,0 e 0,9 g kg⁻¹, respectivamente, pertencentes ao grupo estatístico 'c'. O baixo teor na Floresta, apesar da alta estabilidade do ecossistema, pode ser atribuído à natureza mais recalcitrante da matéria orgânica florestal, que tende a formar frações mais estáveis, como o ácido húmico (AH) e a humina, em detrimento do AF (Carneiro et al., 2022). O valor reduzido no PastoILP (0,9 g kg⁻¹), em comparação com o Pasto (4,3 g kg⁻¹), e o valor intermediário no Cultural ILP (cerca de 2,1 g kg⁻¹, grupo 'bc'), indica que a introdução da fase de lavoura e o conseqüente revolvimento do solo ou a colheita de biomassa podem ter alterado a dinâmica da MOS, resultando em menor acúmulo da fração lábil.

Em conclusão, os resultados de 2022 demonstram a eficácia do AF como indicador da labilidade do carbono e da intensidade da atividade biológica. A

diferença significativa entre o Pasto ($4,3 \text{ g kg}^{-1}$) e o PastoLLP ($0,9 \text{ g kg}^{-1}$) ressalta o impacto da intensificação do uso do solo na saúde biológica. A manutenção de alta atividade enzimática, como observado no Pasto e Pivô, é fundamental para a ciclagem de nutrientes e a sustentabilidade do solo. Portanto, a monitorização da DEH é essencial para guiar a adoção de sistemas de manejo que promovam a conservação e o aumento da qualidade biológica do solo em ambientes agrícolas (Juliano et al., 2023).

Figura 1: Gráfico da Atividade da fração Ácido Fúlvico (AF) da matéria orgânica em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancheira-SP para o ano de 2022.



Obs.: CV% = 70,76; DMS = 1,30. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.1.3 Fração ácido húmico

O ácido húmico (AH) representa a fração mais estável e de maior peso molecular da matéria orgânica do solo (MOS), sendo um bioindicador fundamental da qualidade estrutural e da capacidade de sequestro de carbono a longo prazo do ecossistema edáfico (Silva et al., 2022). Sua concentração está diretamente ligada à estabilidade dos agregados e à resiliência do solo frente a distúrbios de manejo (Paulino et al., 2023). A Figura 2 apresenta a concentração

de AH em diferentes sistemas de uso da terra em 2023, evidenciando variações significativas. O sistema de Pasto se destacou com a maior concentração, atingindo aproximadamente $1,75 \text{ g kg}^{-1}$, sendo estatisticamente superior aos demais tratamentos.

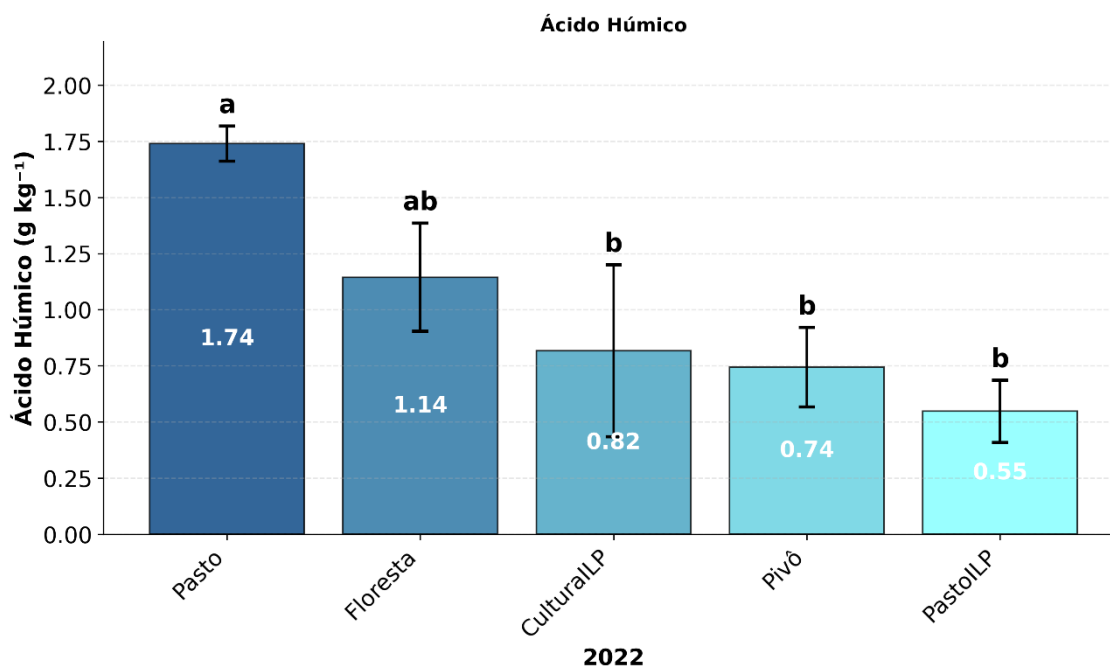
A superioridade do sistema Pasto na acumulação de AH é um achado consistente com a literatura, que atribui a sistemas perenes e de baixo revolvimento a capacidade de promover a humificação e a estabilização do carbono (Mendes, 2025). A constante deposição de biomassa radicular e a ausência de aração ou gradagem favorecem a formação de complexos organominerais mais resistentes à decomposição. O sistema Floresta, frequentemente utilizado como referência de solo não perturbado, apresentou o segundo maior teor, com cerca de $1,15 \text{ g kg}^{-1}$, indicando que, embora a floresta promova alta estabilidade, o manejo contínuo e a intensa ciclagem de nutrientes em pastagens bem estabelecidas podem, em alguns casos, superar a floresta em termos de acúmulo da fração AH.

Em contrapartida, os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) e o Pivô (irrigado) apresentaram as menores concentrações de AH, pertencentes ao grupo estatístico. Os valores variaram de aproximadamente $0,80 \text{ g kg}^{-1}$ (CulturaILP) a $0,55 \text{ g kg}^{-1}$ (PastoILP), com o Pivô registrando cerca de $0,75 \text{ g kg}^{-1}$. A redução na concentração de AH nesses sistemas sugere que a fase de lavoura ou o manejo intensivo, como o revolvimento do solo e a colheita de biomassa, podem ter impactado negativamente a estabilidade da MOS (Carneiro et al., 2022). O valor mais baixo no PastoILP ($0,55 \text{ g kg}^{-1}$) é particularmente notável, indicando que a introdução da componente lavoura, mesmo em um sistema integrado, pode levar a uma perda temporária ou a uma menor taxa de formação da fração húmica mais estável.

Em conclusão, os resultados de 2023 reforçam o papel do AH como um indicador robusto da sustentabilidade do manejo do solo. A alta concentração no Pasto ($1,75 \text{ g kg}^{-1}$) e na Floresta ($1,15 \text{ g kg}^{-1}$) contrasta com os valores mais baixos nos sistemas de uso mais intensivo, como o PastoILP ($0,55 \text{ g kg}^{-1}$). A diferença entre os grupos demonstra que a escolha do sistema de manejo tem um impacto direto na qualidade do solo, favorecendo a estabilidade do carbono em sistemas perenes e de baixo distúrbio. Para aprimorar a avaliação, a análise

da relação entre AH e ácido fúlvico (AH/AF) é recomendada em estudos futuros, pois fornece uma métrica mais precisa do grau de humificação e da maturidade da MOS (Azevedo et al., 2021).

Figura 2: Gráfico da Atividade da fração Ácido Húmico (AH) da MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.



Obs.: CV% = 67,25; DMS = 0,59. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.1.4 Fração Humina

A humina (HUM) representa a fração mais estável e recalcitrante da matéria orgânica do solo (MOS), sendo um componente crucial para o sequestro de carbono e um bioindicador robusto da qualidade e saúde do solo (Gamage et al., 2024; Weber et al., 2024). As análises dos dados apresentados nas Tabela 5 e 6, que quantificam os teores de humina em diferentes sistemas de uso da terra nos anos de 2022 e 2023, respectivamente, corroboram a importância do manejo na estabilização do carbono no solo.

Considerando-se o ano de 2022, na camada superficial (0–10 cm), o sistema Pasto apresentou o maior teor de humina, com 8,04 g kg⁻¹, diferindo significativamente dos sistemas CulturalLP (5,28 g kg⁻¹), PastoILP (5,08 g kg⁻¹)

e Pivô (3,47 g kg⁻¹). Este resultado sugere que a pastagem, com seu aporte contínuo de biomassa radicular e menor revolvimento, promove uma maior humificação e estabilização da MOS na superfície, em comparação com sistemas que envolvem maior intensidade de manejo.

Tabela 5: Variação quantitativa (g kg⁻¹) da Fração Humina (HU) em duas profundidades (0-10 cm e 10 a 20 cm) em cinco diferentes usos da terra no ano de 2022

Tratamento	Profundidade (cm)	
	0 a 10	10 a 20
Pasto	8,04 aA	4,4 aB
Floresta	5,96 abA	5,68 aA
CulturalLP	5,28 bA	3,20 aB
PastolLP	5,08 bA	3,51 aA
Pivô	3,47 bA	3,56 aA

Obs.: números seguidos mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas não diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV: 35,74%; DMS = 1,31.

A distribuição da humina ao longo do perfil do solo revela padrões distintos de estabilidade e dinâmica da MOS. Os sistemas Pasto (8,04 g kg⁻¹ para 0–10 cm e 4,4 g kg⁻¹ para 10–20 cm) e CulturalLP (5,28 g kg⁻¹ para 0–10 cm e 3,20 g kg⁻¹ para 10–20 cm) demonstraram uma redução significativa do teor de humina com o aumento da profundidade, um padrão comum em solos sob manejo que concentram a adição de resíduos na superfície.

Em contraste, os sistemas Floresta (5,96 g kg⁻¹ e 5,68 g kg⁻¹), PastolLP (5,08 g kg⁻¹ e 3,51 g kg⁻¹) e Pivô (3,47 g kg⁻¹ e 3,56 g kg⁻¹) não apresentaram diferença estatística entre as camadas. Sistemas florestais apresentam maior estabilidade da matéria orgânica ao longo do perfil do solo devido ao aporte contínuo de serapilheira, elevada diversidade radicular e menor perturbação física do solo, favorecendo a distribuição homogênea do carbono em profundidade (Scheid et al., 2020).

Os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) demonstraram um desempenho intermediário, mas promissor, na camada superficial (0–10 cm), com valores de humina (5,28 g kg⁻¹ para CulturalLP e 5,08 g kg⁻¹ para PastolLP) superiores ao sistema Pivô (3,47 g kg⁻¹), que representa um manejo mais intensivo.

A adoção de práticas como a ILP tem sido reconhecida por promover a melhoria dos atributos químicos e biológicos do solo, favorecendo a formação de frações mais estáveis da MOS, como a humina (Ferreira et al., 2022).

O teor de humina no PastoILP, apesar de não ser estatisticamente diferente do Pasto na camada superficial, indica que a combinação de culturas e pastagem pode mitigar a perda de carbono estável que ocorreria em sistemas de cultivo contínuo, aproximando-se da qualidade do solo sob pastagem.

Em suma, a humina atua como um indicador sensível e de longo prazo da sustentabilidade do manejo do solo. Os dados de 2022 evidenciam que o sistema Pasto, seguido pela Floresta, são os mais eficientes na acumulação e estabilização da humina na camada superficial.

A baixa concentração de humina no sistema Pivô, especialmente na camada de 0–10 cm, reforça a necessidade de adoção de práticas que minimizem o revolvimento e maximizem o aporte de resíduos, como as implementadas nos sistemas ILP. A manutenção de altos teores de humina, como observado na Floresta (5,68 g kg⁻¹ na camada de 10–20 cm), é fundamental para a resiliência do solo, garantindo a retenção de nutrientes e a estabilidade estrutural em profundidade.

A análise dos dados de 2023, apresentados na Tabela 6, que quantifica o teor de humina em diferentes sistemas de uso da terra, demonstra a influência direta do manejo na estabilização do carbono.

Na camada superficial (0–10 cm), o sistema Floresta apresentou o maior teor de humina (6,28), sendo estatisticamente superior ao PastoILP (4,51). Os sistemas Pasto (5,69), CulturalILP (5,37) e Pivô (4,52) apresentaram valores intermediários, sem diferença estatística entre si e com a Floresta. Estes resultados sugerem que a ausência de revolvimento e o aporte contínuo de resíduos de alta relação C/N em sistemas florestais e de pastagem favorecem a humificação e a proteção física da MOS, concentrando a fração mais estável na camada de maior atividade biológica.

Tabela 6: Variação quantitativa (g kg^{-1}) da Fração Humina (HU) em duas profundidades (0-10 cm e 10 a 20 cm) em cinco diferentes usos da terra no ano de 2023.

Tratamento	Profundidade (cm)	
	0 a 10	10 a 20
Floresta	6,28 aA	4,40 abcB
Pasto	5,69 abA	5,62 aA
CulturalLP	5,37 abA	2,73 bB
Pivô	4,52 abA	4,60 abA
PastolLP	4,51 bA	3,18 bcA

Obs.: números seguidos mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas não diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV: 26,72%; DMS = 1,24.

A distribuição da humina ao longo do perfil do solo (0–10 cm vs. 10–20 cm) revela padrões de estabilidade distintos entre os manejos. O sistema Pasto demonstrou a maior uniformidade e estabilidade, com teores de humina de 5,69 na superfície e 5,62 g kg^{-1} na subsuperfície, sem diferença estatística entre as profundidades. Áreas sob pastagem permanente tendem a aumentar os estoques de carbono em subsuperfície devido ao aporte contínuo de raízes e à menor mobilização do solo, contribuindo para maior estabilidade estrutural e resiliência dos sistemas edáficos (Scheid et al., 2020).

Em contraste, a Floresta (6,28 g kg^{-1} para 0–10 cm e 4,40 g kg^{-1} para 10–20 cm) e a CulturalLP (5,37 g kg^{-1} para 0–10 cm e 2,73 g kg^{-1} para 10–20 cm) apresentaram uma redução significativa do teor de humina com a profundidade, evidenciando uma maior concentração da fração estável na camada superficial, o que é típico de sistemas com aporte de biomassa predominantemente superficial.

Os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) apresentaram comportamentos contrastantes na camada de 10–20 cm. O sistema CulturalLP registrou o menor teor de humina (2,73 g kg^{-1}) nessa profundidade, diferindo estatisticamente do Pasto (5,62 g kg^{-1}) e do Pivô (4,60 g kg^{-1}). Este baixo valor sugere que a fase de cultivo (Lavoura) pode ter resultado em uma menor estabilização da humina na subsuperfície em comparação com o Pasto.

Por outro lado, o sistema PastolLP, embora tenha apresentado o menor teor na superfície (4,51 g kg^{-1}), não demonstrou diferença entre as profundidades (4,51 g kg^{-1} vs. 3,18 g kg^{-1}), indicando que a fase de pastagem pode ter

contribuído para uma distribuição mais homogênea da humina, um efeito benéfico que tem sido associado à melhoria dos atributos químicos e biológicos do solo em sistemas ILP (Ferreira et al., 2022).

Em conclusão, a humina, como indicador de qualidade do solo, reflete a eficácia das práticas de manejo na promoção da estabilidade do carbono. Os dados de 2023 reforçam que a pastagem, com sua estrutura radicular densa e perene, é o sistema mais eficiente na manutenção de altos e estáveis teores de humina em ambas as profundidades.

O sistema Pivô, apesar de ser um manejo intensivo, apresentou um teor de humina na subsuperfície ($4,60 \text{ g kg}^{-1}$) similar ao Pasto, o que pode ser um indicativo de práticas de manejo específicas que favorecem a estabilização do carbono em profundidade, merecendo investigação adicional.

A manutenção de altos teores de humina, conforme observado no Pasto, é fundamental para a sustentabilidade agrícola, garantindo a estabilidade estrutural, a retenção de nutrientes e a resiliência do solo a longo prazo (Vikram et al., 2022).

7.2 Resultados das análises microbiológicas

7.2.1 Análise de variância (Anova)

Os resultados da ANOVA apresentados Tabela 7 referentes aos resultados das análises microbiológicas dos anos de 2022 e 2023, respectivamente, permitem avaliar o comportamento das variáveis microbiológicas nos diferentes sistemas de uso do solo avaliadas neste trabalho - Pasto, PastoILP, CulturalILP, Pivô, Floresta.

De acordo com a ANOVA todos os parâmetros apresentaram efeitos significativos a 5% de probabilidade justificando, portanto, os desdobramentos dos dados no teste de post hoc para análise de comparação de médias.

Tabela 7: Valores de testes de hipóteses ($F < Pr$) para cada parâmetro microbiológico avaliado. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.

Fonte Variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr_F
2022					
CBM	4	25410,07	6352,517	2,03361	0,137924
NBM	4	317,5728	79,39319	2,614012	0,07448
DESIDROGENASE	4	127,1803	31,79508	8,16535	0,00087*
RESPIRAÇÃO	4	0,023264	0,005816	3,793	0,02360*
ARILSULFATASE	4	124672,8	31168,19	35,12562	9,76E-08*
FDA	4	11210,34	2802,584	6,339693	0,002962*
GLICOSIDASE	4	64987,5	16246,88	11,05317	0,000171*
FOSFATASE	4	48287,65	12071,91	11,77184	0,000119*
QUOCIENTE	4	0,002917	0,000729	0,239814	0,911636
2023					
CBM	4	43209,16	10802,29	9,491	0,0004*
NBM	4	169,5403	42,38507	2,672098	0,070151
DESIDROGENASE	4	126,5662	31,64154	4,137	0,0173*
RESPIRAÇÃO	4	0,009216	0,002304	2,598985	0,075647
ARILSULFATASE	4	38119,43	9529,857	33,839	0,0000*
FDA	4	13534,3	3383,575	18,543	0,0000*
GLICOSIDASE	4	79153,39	19788,35	6,329	0,003*
FOSFATASE	4	36605,51	9151,378	11,921	0,0001*
QUOCIENTE	4	0,003335	0,000834	0,762135	0,565019

Obs.: GL - Graus de Liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Fc = F calculado; PrF = Probabilidade. F significativo para o teste Tukey a 5% de probabilidade. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro Wilks que não apresentou significância estatística ($p > 0,05$). Dessa forma, aceitou-se a hipótese nula, concluindo-se que os resíduos seguem distribuição normal. A homogeneidade das variâncias entre os tratamentos foi verificada pelo teste de Levene, cujo resultado também não foi significativo ($p > 0,05$), indicando que as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

7.2.2 Respiração do solo

A análise dos dados apresentados na Figura 3 permite uma discussão aprofundada sobre o impacto de cada sistema de manejo na atividade biológica da respiração do solo.

A respiração foi utilizada como proxy da atividade microbiana, sendo interpretada de acordo com protocolos nacionais e literatura internacional.

O Pasto apresentou a maior taxa de respiração ($0,12 \text{ mg CO}_2 \text{ hora}^{-1}$), indicando elevada atividade microbiana. A cobertura permanente e o aporte contínuo de resíduos de gramíneas favorecem a mineralização e o metabolismo da biota edáfica (Jiang et al., 2022).

A Floresta com uma taxa de $0,090 \text{ mg CO}_2 \text{ hora}^{-1}$ – colocou-se como

uma integrante da respiração intermediária, com aporte contínuo e provavelmente, mais recalcitrante. A complexidade trófica e o microclima estável sustentam atividade robusta, porém amortecida (Lal, 2021a).

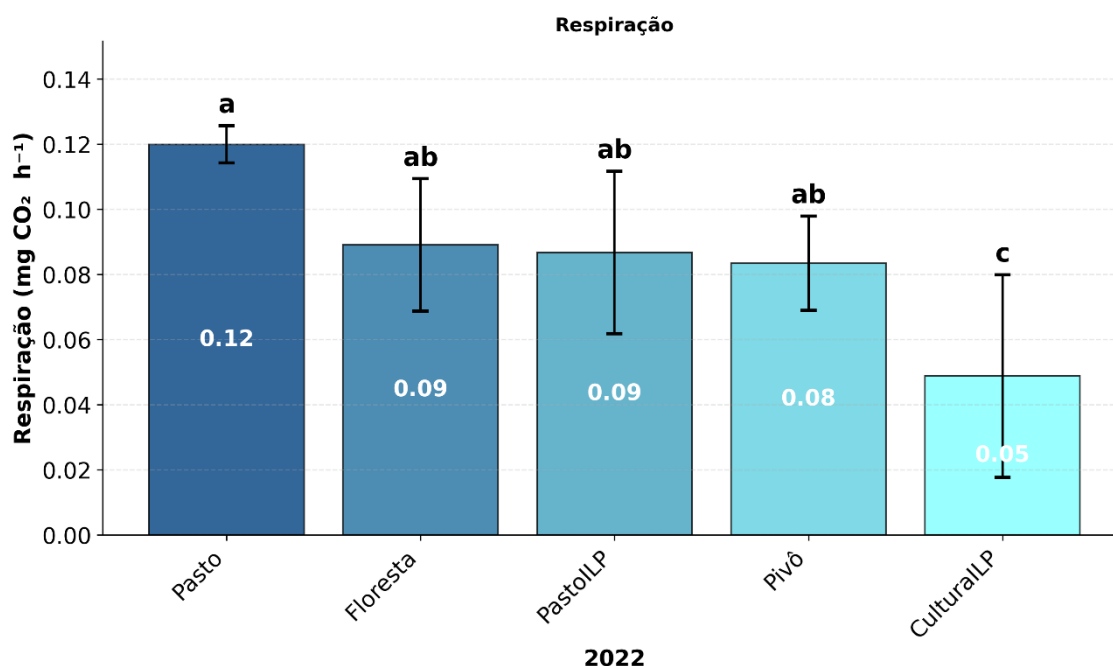
O fator PastoILP alocou-se também no range de respiração intermediária ($0,086 \text{ mg CO}_2 \text{ hora}^{-1}$) e como um sistema integrado lavoura-pecuária sustenta diversidade de substratos e atividade respiratória equilibrada, conforme observado por (Araújo, 2023).

O tratamento Pivô registrou respiração intermediária ($0,082 \text{ mg CO}_2 \text{ hora}^{-1}$), compatível com estabilidade hídrica e pulsos de mineralização após adubações. Sistemas irrigados mantêm funcionalidade biológica moderada (Wang et al., 2021a). A agricultura sob Pivô, embora possa ter alta produtividade, muitas vezes depende de altos insumos e pode levar à compactação do solo e à degradação da matéria orgânica, explicando a supressão da atividade microbiana (Mendes et al., 2021).

O nível de fator CulturalLP apresentou a menor respiração ($0,026 \text{ mg CO}_2 \text{ hora}^{-1}$), sugerindo depleção funcional por menor cobertura e perturbações mecânicas. A recuperação da saúde biológica exige práticas como rotação de culturas e uso de plantas de cobertura (FAO, 2022b). Um estudo global recente confirmou que a intensificação agrícola está consistentemente associada à redução da respiração do solo e de outros indicadores de saúde microbiana (Geisseler et al., 2022).

A adoção de práticas conservacionistas e o uso de bioanálises padronizadas são essenciais para promover a sustentabilidade dos solos agrícolas no oeste paulista.

Figura 3: Gráfico da Atividade da respiração do solo em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.



Obs.: CV (%):48,76; DMS: 0,060. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.2.3 Carbono da Biomassa Microbiana

A Figura 4 apresenta as diferenças significativas ($F_c = 9,491$; $p < 0,0004$) nos valores do Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) entre diferentes sistemas de usos de solo, evidenciando o seu papel como bioindicador da qualidade biológica do solo (Araújo et al., 2021; Mendes, 2025).

A variável CBM apresentou maiores valores para os usos de solo Pasto e Floresta, na ordem de $181,76 \text{ mg C g}^{-1}$ solo e $172,93 \text{ mg C g}^{-1}$ solo, respectivamente. Seguidos pelo PastoILP com $113,75 \text{ mg C g}^{-1}$, Pivô com $87,47 \text{ mg C g}^{-1}$ e CulturalILP com $84,56 \text{ mg C g}^{-1}$. O indicador CBM evidenciou resposta comprovada somente para as análises ocorridas em 2023, segundo ano de coleta e avaliações deste trabalho.

Os maiores resultados para o sistema Floresta corroboram os achados de Mendes et al. (2015), que destacam os sistemas florestais como ambientes com elevada diversidade microbiana e estabilidade ecológica, favorecendo a acumulação de biomassa microbiana.

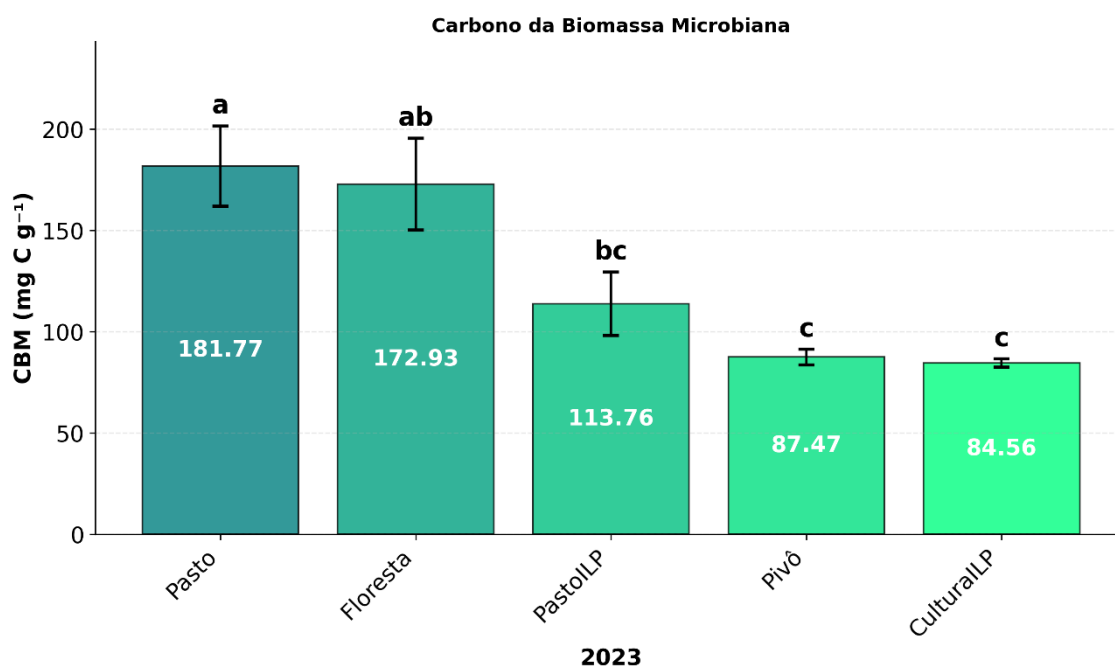
O PastoILP apresenta valores intermediários de CBM. Essa ambiguidade estatística sugere uma transição entre sistemas de alta e média qualidade biológica. Embora o componente pecuário possa reduzir a diversidade vegetal, o manejo integrado ainda preserva parte da funcionalidade microbiana, como discutido por Mendes et al. (2023) na Plataforma Saúde do Solo da Embrapa. Ainda, de acordo com Araújo (2023) os sistemas ILP bem equilibrados podem se aproximar da qualidade de solos florestais

O Pivô, com valores de CBM mais baixos e da ordem de $87,47 \text{ mg C g}^{-1}$, representa um sistema intensivo de irrigação, geralmente associado ao uso elevado de insumos químicos e à menor diversidade vegetal. Esses fatores impactam negativamente a microbiota do solo, reduzindo sua biomassa e atividade, como evidenciado por Araújo et al. (2021) em estudos sobre degradação biológica em sistemas irrigados e sucessão de culturas.

O CulturalILP apresenta o menor valor. Representa sistemas agrícolas convencionais com maior grau de perturbação, uso intensivo de insumos e menor cobertura vegetal. Bhaduri et al. (2022) alertam que tais sistemas tendem à redução da biomassa microbiana e da capacidade de ciclagem de nutrientes.

De acordo com Singh et al. (2025) em síntese, os dados reforçam a tese de que o uso do solo influencia diretamente a biomassa microbiana de carbono, sendo a CBM um indicador sensível e eficaz para avaliar a saúde do solo. Sistemas florestais e ILP demonstram maior capacidade de sustentação da atividade microbiana, enquanto sistemas intensivos e extensivos convencionais apresentam degradação biológica significativa. A adoção de práticas conservacionistas e integradas é essencial para a manutenção da qualidade biológica dos solos tropicais.

Figura 4: Gráfico da Atividade do Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancheira-SP para o ano de 2023.



Obs.: CV (%): 41,13; DMS: 45,23. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.2.4 Desidrogenase

A atividade da desidrogenase em cinco diferentes usos da terra nos anos de 2022 e 2023 revela uma clara distinção no comportamento da atividade da desidrogenase entre os diferentes usos da terra, bem como uma variação entre os anos avaliados (Figura 5).

Em 2022, os maiores valores de atividade da desidrogenase foram observados nas áreas de Pasto (9,79 μg de TTF g^{-1} de Solo) e Pivô (9,40 μg de TTF g^{-1} de Solo), que não diferiram entre si ao nível de 5%. Estes resultados sugerem que, em condições de manejo intensivo, como a pastagem e a irrigação por Pivô, a atividade microbiana pode ser elevada devido à constante entrada de resíduos orgânicos (raízes, excrementos) e à manutenção de condições de umidade favoráveis (Silva et al., 2024a).

Por outro lado, a área de Floresta apresentou o menor valor (4,4 μg de TTF g^{-1} de Solo), diferindo estatisticamente de todos os outros usos. Este

resultado é contraintuitivo, uma vez que a floresta é frequentemente utilizada como referência de alta qualidade biológica do solo. Uma possível explicação para este valor reside na natureza da matéria orgânica da floresta, que pode ser mais recalcitrante e menos acessível à microbiota, ou em condições edafoclimáticas específicas da amostragem (Vieira, 2025).

Os sistemas de uso que estão associados ao de Integração Lavoura-Pecuária (ILP), tanto o CulturalILP (5,3 μg de TTF g^{-1} de Solo) quanto o PastoILP (9 μg de TTF g^{-1} de Solo), apresentaram valores intermediários. O PastoILP, que combina a pastagem com a lavoura, demonstrou uma atividade enzimática significativamente maior que o CulturalILP, que pode estar sob maior influência do revolvimento do solo e menor aporte de biomassa radicular da pastagem (Embrapa, 2025).

O pareamento entre os anos de 2022 e 2023 demonstra um aumento geral na atividade da desidrogenase em quase todos os usos da terra, indicando uma possível melhoria nas condições de solo ou uma variação climática favorável à atividade microbiana no ano de 2023.

A área de Floresta também apresentou um aumento significativo, de (4,4 μg de TTF g^{-1} de Solo) para (8,0 μg de TTF g^{-1} de Solo), passando a ser estatisticamente semelhante aos sistemas com ILP e Pivô. Este aumento pode ser atribuído a variações sazonais ou a um período de maior decomposição de serapilheira no ano de 2023.

Os sistemas ILP e Pivô mantiveram-se em patamares elevados e estáveis, com o PastoILP (9,8 μg de TTF g^{-1} de Solo) e o Pivô (9,6 μg de TTF g^{-1} de Solo) apresentando resultados estatisticamente semelhantes entre si e ao Cultural ILP (9,0 μg de TTF g^{-1} de Solo) em 2023. De acordo com (Reis et al., 2026) a estabilidade em altos níveis de atividade enzimática nesses sistemas reforça a eficácia de práticas como a ILP na manutenção da saúde do solo.

Por fim, a atividade da desidrogenase se mostrou um indicador eficaz para diferenciar a qualidade biológica do solo sob distintos usos da terra. Os resultados de 2023, em particular, destacam a Pastagem Convencional como o uso com maior atividade microbiana, superando a Floresta e os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária.

A atividade da desidrogenase responde rapidamente às alterações de manejo, disponibilidade de resíduos orgânicos e condições de umidade do solo, sendo considerada um indicador sensível da atividade microbiana edáfica (Alvarenga et al., 2023).

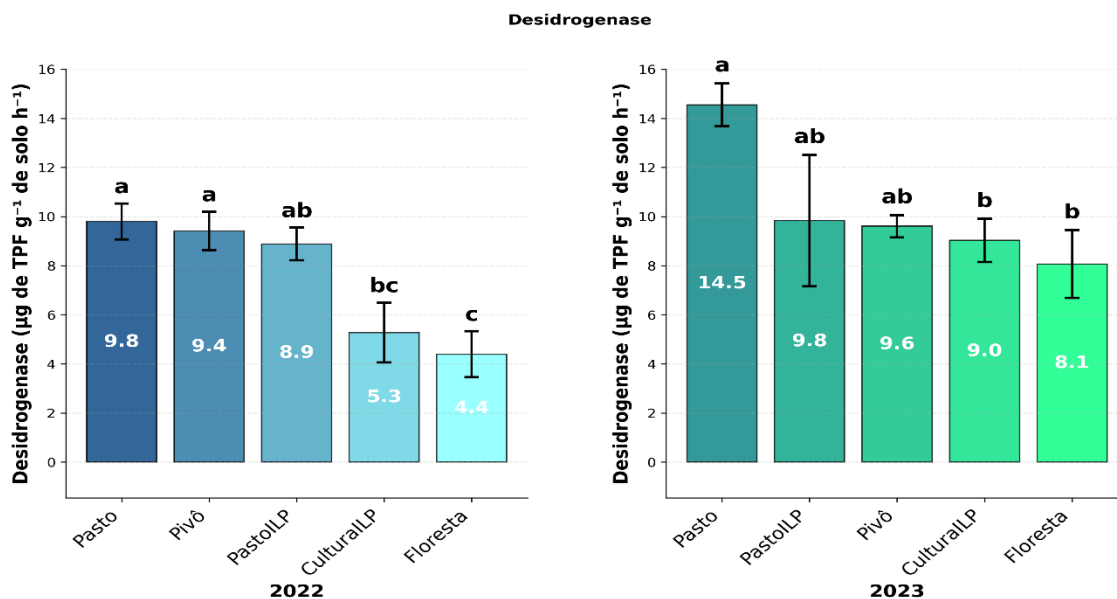
O aumento mais notável ocorreu na área de Pasto, que saltou de (9,8 μg de TTF g^{-1} de solo) em 2022 para 14,5 μg de TTF g^{-1} de solo em 2023, atingindo o maior valor. Este aumento pode ser reflexo de um manejo mais adequado da pastagem no segundo ano, como o ajuste da lotação animal ou a recuperação da cobertura vegetal, que promovem maior aporte de carbono e melhoram a estrutura do solo (Martins et al., 2024).

Vale ressaltar que a desidrogenase é sensível a mudanças no ambiente edáfico, sendo um parâmetro eficaz para monitorar a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Stott, 2019).

A continuidade e manutenção de estudos de ambientes diversificados é fundamental para a compreensão das tendências de longo prazo e orientar práticas de manejo visando a favorecer a atividade microbiana, refletindo maior qualidade biológica desses ecossistemas sob ILP.

Recomenda-se que o monitoramento enzimático, associado a outros indicadores microbiológicos e químicos no longo prazo tenham um prosseguimento sequencial para uma avaliação mais abrangente da saúde do solo.

Figura 5: Gráfico da Atividade da Desidrogenase (DSID) em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV (%): 38,80; DMS: 2,64; 2023: CV (%): 36,96; DMS: 3,71. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.2.5 Arilsulfatase

A Figura 6 mostra que em 2022, observou-se um gradiente amplo entre tratamentos, com valores mais elevados em Pasto (228,6 µg PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) e mais baixos em Pivô (40,0 µg PNP g⁻¹ de solo h⁻¹), enquanto 2023 apresentou redução geral dos valores, mantendo Pasto (153,8 µg PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) como maior média e Pivô (42,1 µg PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) como a menor. Do ponto de vista ecológico-funcional, esse comportamento é coerente com a literatura recente, que associa a arilsulfatase à disponibilidade de substratos orgânicos, ao teor/qualidade de matéria orgânica e ao vigor do microbioma; tais fatores tendem a ser favorecidos por sistemas com maior aporte e continuidade de resíduos (raízes, exsudatos e serapilheira) e menor perturbação (Arthur et al., 2025).

Na comparação estatística de 2022, o Pasto (228,6 µg PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) e a Floresta (181,8 µg PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) diferiram dos demais tratamentos, constituindo-se os dois melhores sistemas agrícolas. Esse padrão é compatível com evidências de que intensificação e/ou maior distúrbio (preparo, tráfego, simplificação de cobertura e menor aporte de resíduos de alta qualidade)

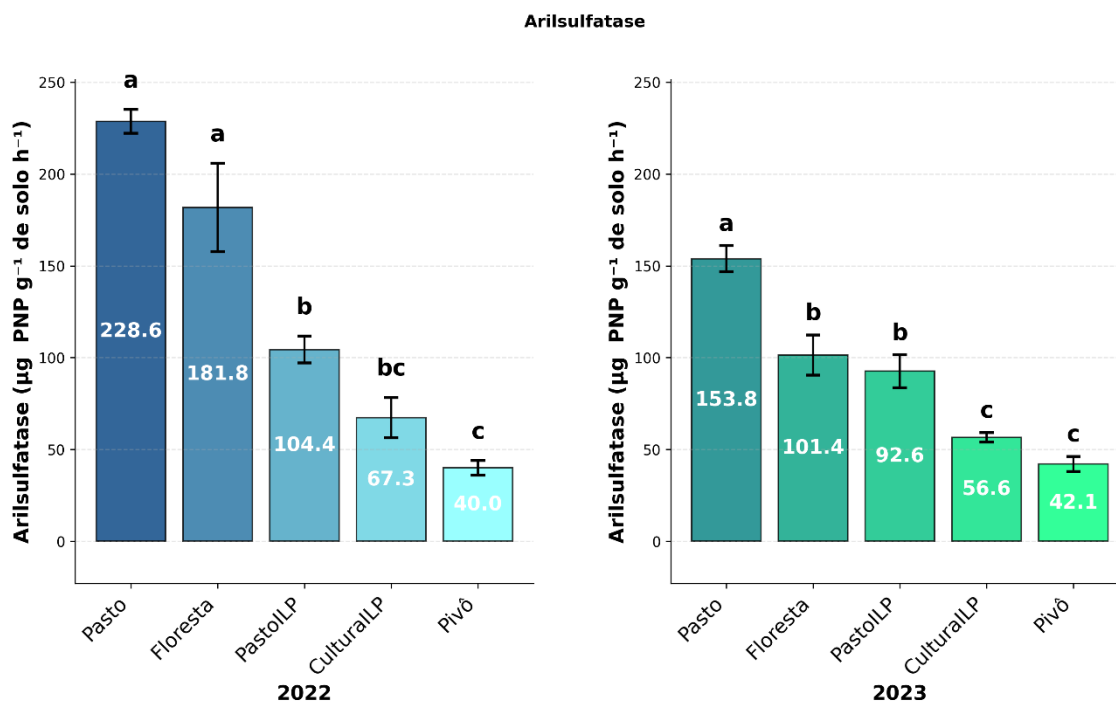
costumam reduzir indicadores enzimáticos associados à ciclagem de nutrientes quando comparados a ambientes perenes (pastagens bem estabelecidas) ou nativos (Arthur et al., 2025; Costa et al., 2024).

Em 2023, a ordenação estatística mudou parcialmente e os valores foram, em geral, menores do que em 2022 para a maioria dos tratamentos, com exceção do Pivô, que permaneceu praticamente estável ($42,1 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1} em 2023 vs. $43,2 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1} em 2022). Pasto ($153,8 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1}) permaneceu como o tratamento de maior atividade e diferiu dos demais. Floresta ($101,4 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1}) e PastoILP ($92,6 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1}) não diferiram entre si, compondo um nível intermediário. CulturalILP ($56,6 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1}) e Pivô ($42,1 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1}) também não diferiram entre si, mantendo-se no patamar inferior. Do ponto de vista de processo, variações interanuais são esperadas porque enzimas do solo respondem a disponibilidade hídrica, temperatura e pulsos de entrada de carbono; eventos de estresse hídrico, por exemplo, podem reduzir biomassa ativa e modular o perfil enzimático, alterando a intensidade de mineralização de nutrientes (Bogati et al., 2025; Philipp et al., 2025).

Ao integrar os dois anos, destaca-se que Pasto apresenta não apenas os maiores níveis, mas também a maior queda absoluta entre anos (de $228,6$ para $153,8 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1} , redução em torno de 33%), enquanto Floresta reduziu de $181,8$ para $101,4 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1} (aproximadamente 56%) e PastoILP de $104,3$ para $92,6 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1} (em torno de 11%). Em contraste, CulturalILP caiu de $67,3$ para $56,6 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1} (próximo a 16%) e Pivô praticamente não variou ($40,0$ para $42,1 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ de solo h^{-1}). Esses resultados sustentam a interpretação técnica de que sistemas com maior aporte de MOS e atividade microbiana tendem a sustentar maior arilsulfatase, enquanto sistemas agrícolas mais intensivos podem operar com menor capacidade enzimática para ciclagem de S, mesmo quando irrigados, porque a irrigação não substitui integralmente o papel da qualidade/continuidade de resíduos e do habitat microbiano. Em termos de saúde do solo, trabalhos recentes reforçam o uso de arilsulfatase como indicador funcional de ciclagem de nutrientes associado à MOS, sendo sensível a mudanças de uso e intensidade de manejo (Arthur et al.,

2025; Costa et al., 2024).

Figura 6: Gráfico da Atividade da Arilsulfatase (ARILS) em cinco diferentes usos de terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancheira-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV (%): 61,57; DMS: 39,94; 2023: CV (%):47,73; DMS: 22,50. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.2.6 Fluoresceína diacetato

A Figura 7 mostra que nos dois anos, os valores apresentaram amplitude considerável entre tratamentos, variando de 64,1 ($\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1}) a 115,4 ($\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1}) em 2022 e de 46,7 ($\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1}) a 104,5 ($\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1}) em 2023. Esse comportamento é consistente com evidências recentes de que a atividade microbiana e enzimática do solo responde simultaneamente ao aporte de carbono, à cobertura vegetal, à perturbação física e às condições de umidade/temperatura, resultando em diferenças detectáveis entre usos do solo (Arthur et al., 2025; Bogati et al., 2025). Além disso, a própria base metodológica do ensaio (hidrólise de FDA como medida sensível e rápida de atividade microbiana total) é consolidada e tem sido reiterada em estudos contemporâneos de qualidade do solo (Schnürer, 1982).

Em 2022, a Floresta apresentou a maior média de FDA (115,4 $\mu\text{g de FDA}$

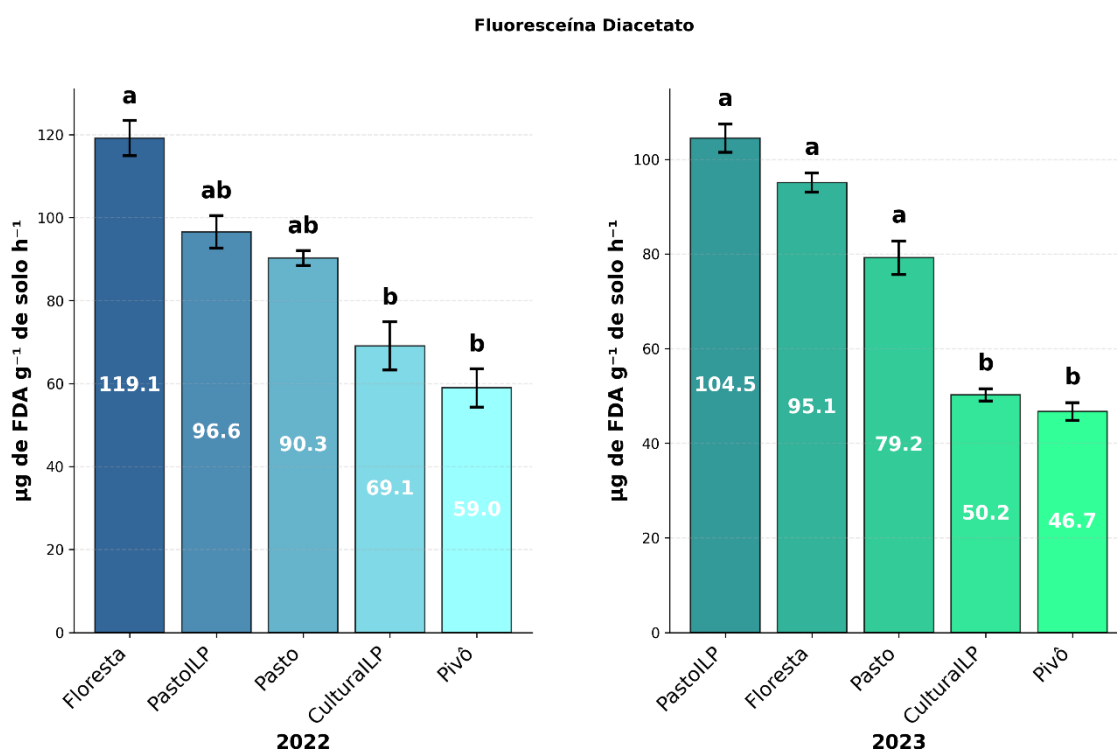
g^{-1} de solo h^{-1}) e não diferiu estatisticamente do PastoILP ($102,7 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1}). O Pasto ($93,3 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1}) não diferiu do PastoILP e não diferiu do CulturalILP ($68,4 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1}), indicando uma zona de transição entre sistemas com maiores e menores atividades. Já o Pivô ($64,1 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1}) ficou no patamar inferior e não diferiu do CulturalILP, mas foi inferior aos tratamentos com maiores valores (Floresta e PastoILP). Em termos de processo, níveis mais elevados em Floresta e em PastoILP podem refletir maior continuidade de entradas orgânicas e melhor manutenção de micro-habitats (porosidade, agregação e proteção física da MOS), sustentando maior atividade microbiana integrada; isso é coerente com sínteses e avaliações recentes de saúde do solo que vinculam MOS e cobertura vegetal a funções de ciclagem e atividade enzimática (Arthur et al., 2025; Duarte et al., 2025).

Em 2023, observa-se redução geral da FDA em relação a 2022, com destaque para CulturalILP e Pivô, que permaneceram no estrato inferior ($50,2 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1}) e $46,7 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1} , respectivamente) e não diferiram entre si. O maior valor foi registrado em PastoILP ($104,5 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1}), que não diferiu da Floresta ($95,1 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1}), enquanto o Pasto ($79,2 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1}) ocupou posição intermediária e não diferiu da Floresta, mas foi superior ao grupo inferior (CulturalILP e Pivô) e inferior ao PastoILP. A literatura recente mostra que a umidade do solo e eventos de estresse (incluindo variações interanuais) podem reduzir biomassa ativa e alterar o perfil de atividade enzimática, afetando indicadores integrativos como FDA; assim, a queda interanual pode refletir mudanças climáticas/edáficas e não apenas manejo (Bogati et al., 2025; Philipp et al., 2025).

Ao integrar os resultados, o padrão mais robusto é a recorrência de valores mais baixos em sistemas agrícolas de maior simplificação/perturbação no conjunto avaliado, especialmente Pivô (de $64,1$ para $46,7 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1}); aproximadamente 27% de redução) e CulturalILP (de $68,4$ para $50,2 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1} ; próximo de 27% de redução). Em contraste, Floresta manteve níveis elevados, embora com redução (de $115,4$ para $95,1 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1} ; aproximadamente 18%), e o PastoILP mostrou alta atividade nos dois anos (de $102,7$ para $104,5 \mu\text{g}$ de FDA g^{-1} de solo h^{-1} ; estabilidade).

Esses resultados são tecnicamente consistentes com a hipótese de que sistemas integrados com fase de pastagem e maior aporte de resíduos podem sustentar atividade microbiana global comparável à de ambientes nativos em determinados contextos, enquanto sistemas mais intensivos podem apresentar menor atividade integrada, sobretudo quando fatores ambientais (umidade/temperatura) se tornam limitantes (Duarte et al., 2025; Philipp et al., 2025). Como ressalva metodológica para evitar inferências indevidas, as conclusões aqui são restritas à comparação de médias e à significância indicada no gráfico; inferências causais exigiriam controle adicional (histórico de manejo, fertilidade, textura e séries climáticas) e modelos explicativos.

Figura 7: Gráfico da Atividade da Fluoresceína Diacetato (FDA) em cinco diferentes usos de terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancheira-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV (%): 33,63; DMS: 28,19; 2023: CV (%): 35,02; DMS: 18,11.
Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa

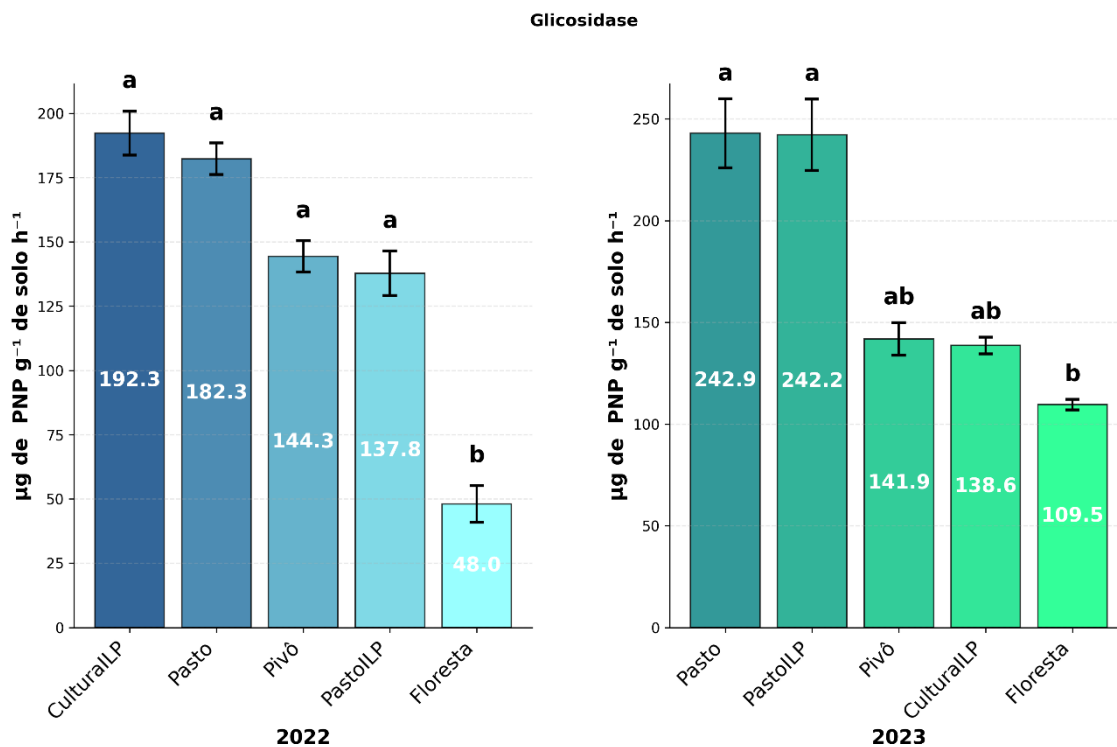
7.2.7 Glicosidase

A atividade da enzima glicosidase (Figura 8) em solos do oeste paulista apresentou variações significativas entre 2022 e 2023, refletindo a influência combinada de sistemas de uso do solo e condições climáticas. Em 2022, o fragmento de Floresta apresentou a menor atividade ($48,03 \text{ U g}^{-1}$), diferindo estatisticamente dos sistemas agrícolas, que variaram entre $137,78$ (PastoILP) e $192,26 \text{ U g}^{-1}$ (CulturalLP). Em 2023, observou-se incremento geral, com Floresta atingindo $109,53 \text{ U}$, CulturalLP e Pivô em torno de $138\text{--}142 \text{ U g}^{-1}$, e PastoILP e Pasto superando 242 U g^{-1} . O aumento de precipitação em 2023 (1.250 mm contra 1.026 mm em 2022) favoreceu a expressão enzimática, especialmente em Floresta, cuja atividade elevou-se em 128% (Barbosa, 2022).

A elevação de glicosidase nos sistemas agrícolas, particularmente Pasto e PastoILP, indica resposta ativa das comunidades microbianas à disponibilidade de substratos orgânicos e condições hídricas favoráveis (Araújo, 2022). Sistemas com perturbação recorrente, como CulturalLP e Pivô, apresentaram incrementos mais modestos, sugerindo limitação de resposta funcional frente a mudanças climáticas (Chen et al., 2023a). A atividade de glicosidase é reconhecida como bioindicador confiável da qualidade biológica do solo, refletindo a capacidade funcional de processar matéria orgânica e sustentar ciclos biogeoquímicos (Embrapa, 2018).

A atividade da enzima glicosidase em solos do oeste paulista é sensível tanto ao manejo quanto às variações climáticas, sendo mais elevada em sistemas agrícolas e favorecida por condições hídricas adequadas. O incremento observado em Floresta em 2023 evidencia potencial de recuperação funcional em áreas preservadas sob condições ambientais favoráveis. Para o oeste paulista, a manutenção de atividade enzimática elevada em sistemas agrícolas indica funcionalidade biológica presente, mas deve ser balanceada com indicadores complementares de qualidade do solo para orientar decisões de sustentabilidade (Schulze et al., 2024; Silva et al., 2021).

Figura 8: Gráfico da Atividade da Glicosidase (GLI) em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rانcharia-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV (%): 44,03; DMS: 51,40; 2023: CV (%): 44,77; DMS: 74,97. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.2.8 Fosfatase

A análise da atividade da enzima fosfatase (Figura 9) em cinco sistemas de manejo do solo na região do oeste paulista revelou padrões distintos entre os anos de 2022 e 2023, demonstrando a responsividade desta enzima às práticas de manejo e variações ambientais. Em 2022, a atividade de fosfatase apresentou amplitude de variação de 118,420 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$, oscilando entre 87,146 (CulturalLP) e 205,566 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Floresta), revelando diferenciação clara entre sistemas conservacionistas e intensivos. Conforme (Teixeira, 2023), a atividade da fosfatase ácida constitui importante indicador da eficiência do manejo de fósforo em agricultura tropical, refletindo a capacidade do solo em disponibilizar nutrientes através da hidrólise de ésteres de fosfato orgânico.

Os sistemas de menor perturbação edáfica (Floresta com 205,566 e Pasto com 153,264 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$) apresentaram atividades significativamente superiores,

enquanto os sistemas de maior distúrbio mecânico (CulturalLP com 87,146 e Pivô com 89,622 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$) exibiram redução de até 58% na atividade enzimática. As condições climáticas registradas durante o período de maio de 2021 a abril de 2022 incluíram precipitação de 1.026,0 mm, temperatura média de 23,6°C, déficit hídrico de -316 mm e excesso hídrico de 64 mm. Conforme indicado por Metzger (2024), os resultados devem ser relatados de maneira clara e completa, permitindo que outros pesquisadores possam compreender e avaliar os achados, sendo fundamental que os resultados respondam às perguntas de pesquisa ou hipóteses formuladas no início do estudo.

A menor disponibilidade hídrica em 2022 pode ter limitado a atividade microbiana e, conseqüentemente, a produção de fosfatase, particularmente em sistemas que apresentam menor resiliência biológica. Conforme recomendações da Embrapa (2025), a atividade enzimática do solo responde significativamente a variações nas condições hídricas, sendo fundamental para compreender os mecanismos de manutenção da qualidade biológica do solo.

Em 2023, ocorreu mudança substancial no padrão de atividade enzimática, com amplitude reduzida para 87,958 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (diferença entre 95,770 e 183,728 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$), representando redução de 26% na variabilidade entre tratamentos. As condições climáticas do período de maio de 2022 a abril de 2023 foram significativamente distintas: precipitação de 1.250,0 mm (aumento de 21,8%), temperatura média de 22,2°C (redução de 1,4°C), déficit hídrico de apenas -59 mm (melhoria de 81,3% em relação a 2022) e excesso hídrico de 434 mm (aumento de 6,8 vezes). Esta melhoria substancial nas condições hídricas resultou em convergência dos sistemas de manejo intensivo em faixa comum de baixa atividade (Pivô 95,770, CulturalLP 98,492 e PastoILP 116,774 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$), enquanto os sistemas de menor intensidade de distúrbio (Pasto 176,774 e Floresta 183,728 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$) aproximaram-se entre si, diferindo de apenas 7,0 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$.

Conforme destacado por Vasconcelos et al. (2021) e Nolan et al. (2021), as enzimas exercem papel funcional crucial na manutenção do solo devido às suas atividades catalíticas em reações químicas essenciais, fornecendo dados reprodutivos relacionados ao manejo empregado e indicando o desempenho dos

microrganismos na ciclagem de nutrientes. O padrão observado sugere que a melhor condição hídrica em 2023 permitiu melhor responsividade biológica do solo, especialmente nos sistemas de maior integridade estrutural. O sistema de Pasto contínuo semi-extensivo demonstrou notável resiliência, aumentando sua atividade em 15,4% (de 153,264 para 176,774 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$), aproximando-se significativamente da Floresta, enquanto o sistema de Floresta apresentou redução de 10,6%, possivelmente refletindo otimização natural em resposta às condições ambientais alteradas.

A persistência de baixa atividade nos sistemas intensivos (Pivô, CulturalLP e PastoLP) mesmo diante da melhoria climática substancial em 2023 reforça conclusões de estudos recentes compilados em análises técnicas da Embrapa (Embrapa, 2025) e Rodrigues et al. (2022), que indicam que a atividade enzimática constitui um dos indicadores biológicos de solo que apresentam respostas mais imediatas às alterações de manejos agrícolas. Sistemas submetidos a perturbações mecânicas frequentes apresentam redução estruturada da resiliência biológica e menor capacidade de resposta a condições ambientais melhoradas, evidenciando a primazia do fator manejo sobre fatores climáticos na determinação da atividade enzimática edáfica.

Conforme apontado por Silva et al. (2022), a discussão constitui o local do artigo que abriga os comentários sobre o significado dos resultados, a comparação com outros achados de pesquisas e a posição do autor frente aos dados obtidos. Neste contexto, observou-se que o melhor sistema de manejo entre os cinco avaliados foi o Pasto contínuo semiextensivo, que apresentou capacidade superior de manutenção e recuperação da atividade biológica do solo sob variações climáticas. Esta conclusão fundamenta-se em múltiplos critérios comparativos: (1) responsividade positiva às condições ambientais melhoradas, com aumento de 15,4% da atividade de fosfatase entre 2022 e 2023; (2) aproximação progressiva dos indicadores de qualidade biológica em relação ao sistema de referência (Floresta), reduzindo a diferença de 52,302 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ em 2022 para apenas 7,0 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ em 2023; e (3) manutenção de atividade biológica elevada mesmo sob limitações hídricas (153,264 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ em 2022), demonstrando resiliência compatível com a sustentabilidade agrícola de longo prazo.

De acordo com as recomendações técnicas da Embrapa Agropecuária Oeste Embrapa (2023), sistemas de pastagens bem manejados que preservem cobertura vegetal permanente constitui estratégia importante para manutenção da qualidade do solo em regiões tropicais e subtropicais.

A atividade enzimática elevada e responsiva observada no Pasto contínuo reflete esta capacidade de manutenção de atributos biológicos satisfatórios, particularmente em ciclos de intensa pressão climática. Os sistemas intensivos (Pivô, CulturalLP e PastoLP) apresentaram respostas limitadas e convergentes em faixa de baixa atividade em 2023 ($95\text{-}117 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$), independentemente das melhorias climáticas significativas, reforçando que o manejo conservacionista é determinante primário da qualidade biológica.

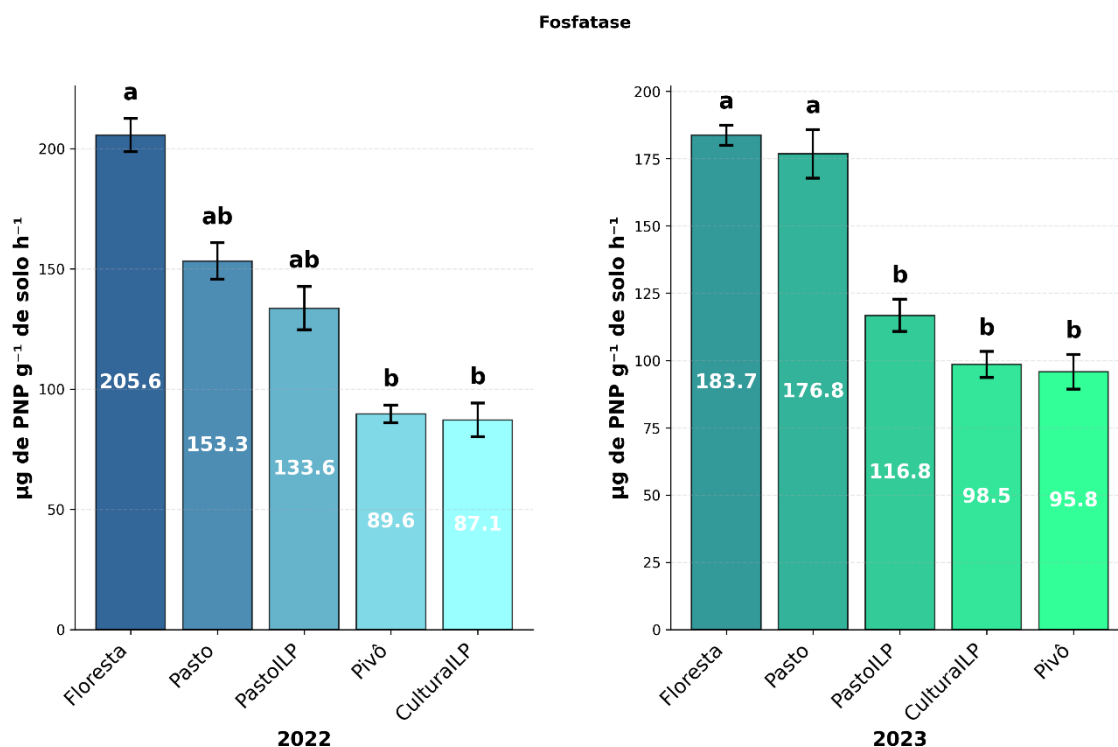
Segundo Fontenelle (2024), as conclusões consistem em afirmações concisas que respondem às proposições apresentadas no início do trabalho, com base na análise e interpretação dos resultados alcançados.

Assim, as análises compiladas pela Embrapa (Embrapa, 2025) indicam que a atividade de enzimas edáficas como a fosfatase constitui bioindicador responsivo capaz de revelar diferenças sutis de qualidade do solo, sendo ferramenta diagnóstica valiosa para decisões de manejo agrícola sustentável.

A Embrapa Meio Ambiente (2022b) recomenda que a fosfatase seja incluída em protocolos de caracterização de qualidade biológica, particularmente em regiões de transição do Cerrado-Floresta Atlântica como o oeste paulista, onde a biodiversidade edáfica é crítica para manutenção de produtividade agrícola em longo prazo.

Portanto, a adoção do sistema de pastagem contínua semiextensiva, associado a práticas complementares de conservação de solo e manejo orgânico, representa alternativa viável e cientificamente fundamentada para otimizar a qualidade biológica dos solos agrícolas regionais, equilibrando produtividade e sustentabilidade ambiental.

Figura 9: Gráfico da Atividade da Fosfatase (FOS) em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV (%): 41,20; DMS:42,94; 2023: CV (%): 36,07; DMS: 37,15. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.3 Análise conjunta de atributos da matéria orgânica do solo e atividades enzimáticas

7.3.1 Análise de variância (ANOVA)

Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 8 referentes aos resultados das análises de cada parâmetro microbiológico e frações químicas da matéria orgânica avaliados em conjunto, à profundidade de 0,0-0,10 cm nos anos de 2022 e 2023, respectivamente, permitem avaliar o comportamento de ambas as variáveis nos diferentes sistemas de uso do solo tratados neste trabalho - Pastagem, PastoILP, CulturalILP, Pivô, Floresta.

De acordo com a ANOVA os parâmetros desidrogenase, arilsulfatase, glicosidase, fosfatase, ácido fúlvico e humina apresentaram efeitos significativos a 5% de probabilidade no ano de 2022 justificando, portanto, os desdobramentos dos dados no teste de post hoc para análise de comparação de médias.

Analogamente, a ANOVA para os parâmetros carbono da biomassa microbiana, desidrogenase, arilsulfatase, fluoresceína diacetato, glicosidase, fosfatase e humina apresentaram efeitos significativos a 5% de probabilidade no ano de 2023 justificando, portanto, os desdobramentos dos dados no teste de post hoc para análise de comparação de médias.

Tabela 8: Valores de testes de hipóteses ($F < Pr$) para cada parâmetro microbiológico e frações químicas da matéria orgânica avaliados em conjunto. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.

Fonte Variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr_F
2022					
CBM	4	6860,516	1715,129	0,698203	0,614327
NBM	4	168,3829	42,09572	2,415823	0,134164
DESIDROGENASE	4	77,15674	19,28918	5,734157	0,017733*
RESPIRAÇÃO	4	0,010056	0,002514	2,756257	0,103737
ARILSULFATASE	4	75722,92	18930,73	62,45217	4,52E-06*
FDA	4	5840,284	1460,071	6,295042	0,013638*
GLICOSIDASE	4	24740,15	6185,038	4,307643	0,037719*
FOSFATASE	4	36386,64	9096,661	11,75923	0,001973*
QUOCIENTE	4	0,002474	0,000619	0,601634	0,672308
ÁCIDO FÚLVICO	4	35,57066	8,892664	6,53951	0,012225*
ÁCIDO HÚMICO	4	4,036263	1,009066	1,984837	0,189887
HUMINA	4	33,02904	8,257261	5,08969	0,024519*
2023					
CBM	4	43209,16	10802,29	9,490863	0,000396*
NBM	4	169,5403	42,38507	2,672098	0,070151
DESIDROGENASE	4	126,5662	31,64154	4,136933	0,017281*
RESPIRAÇÃO	4	0,009216	0,002304	2,598985	0,075647
ARILSULFATASE	4	38119,43	9529,857	33,83936	1,27E-07*
FDA	4	13534,3	3383,575	18,54302	7,45E-06*
GLICOSIDASE	4	79153,39	19788,35	6,329492	0,002984*
FOSFATASE	4	36605,51	9151,378	11,92106	0,000111*
QUOCIENTE	4	0,003335	0,000834	0,762135	0,565019
ÁCIDO FÚLVICO	4	5,657124	1,414281	0,475586	0,753139
ÁCIDO HÚMICO	4	40,70965	10,17741	3,500498	0,030971*
HUMINA	4	16,15849	4,039621	3,371056	0,035035*

Obs.: GL - Graus de Liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Fc = F calculado; PrF = Probabilidade. F significativo para o teste Tukey a 5% de probabilidade. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro Wilks que não apresentou significância estatística ($p > 0,05$). Dessa forma, aceitou-se a hipótese nula, concluindo-se que os resíduos seguem distribuição normal. A homogeneidade das variâncias entre os tratamentos foi verificada pelo teste de Levene, cujo resultado também não foi significativo ($p > 0,05$), indicando que as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

7.3.2 Fração ácido fúlvico

A Figura 10 evidencia variações significativas nos teores de Ácido Fúlvico entre os sistemas avaliados. O sistema de Pasto apresentou o maior teor médio de AF, com $4,37 \text{ g kg}^{-1}$, seguido de perto pelo sistema Pivô, com $3,80 \text{ g kg}^{-1}$. Ambos os sistemas não diferiram estatisticamente entre si, mas foram significativamente superiores aos sistemas Floresta e PastoILP. A CulturalLP registrou um teor intermediário de $2,10 \text{ g kg}^{-1}$, não diferindo estatisticamente de Pasto, Pivô, Floresta ou PastoILP. Os menores teores foram observados na Floresta ($0,90 \text{ g kg}^{-1}$) e no PastoILP ($0,48 \text{ g kg}^{-1}$), que também não apresentaram diferença estatística entre si. Respostas indicam que Pasto e Pivô são superiores a Floresta e PastoILP, enquanto CulturalLP se posiciona de forma intermediária.

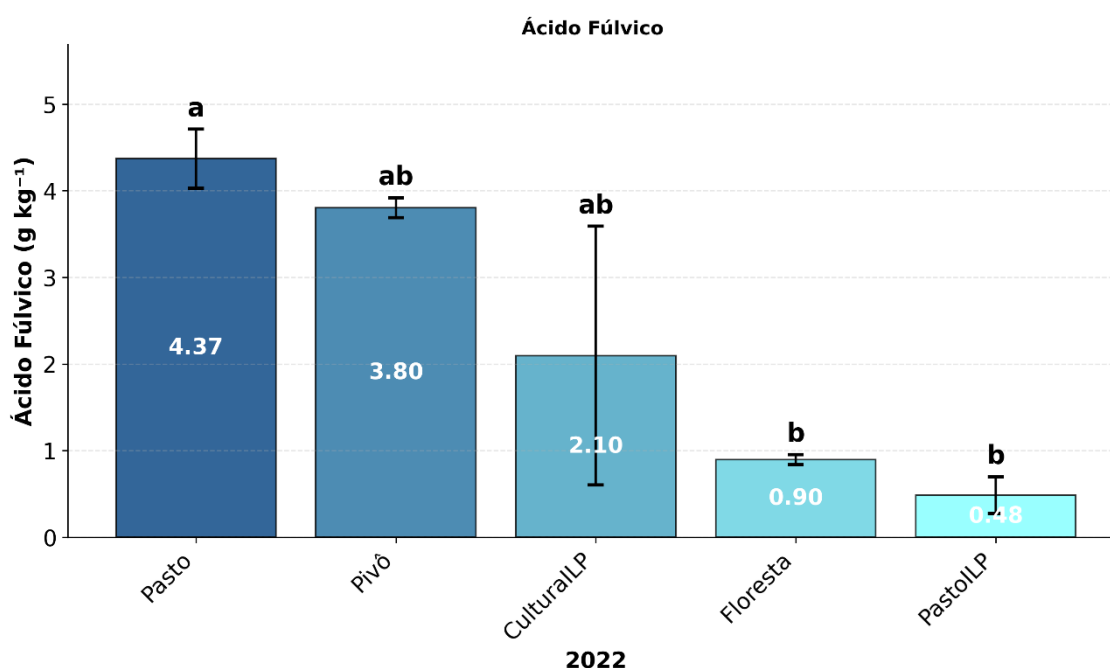
Os resultados sugerem que sistemas com maior aporte de biomassa e menor revolvimento do solo, como o Pasto, podem favorecer o acúmulo de ácido fúlvico. A alta densidade radicular das gramíneas em pastagens contribui para a formação de frações húmicas, incluindo o AF, que são essenciais para a ciclagem de nutrientes e a estabilidade do solo (Rosset et al., 2016). O sistema Pivô, embora seja uma cultura convencional, pode ter seus teores de ácido fúlvico elevados devido à constante umidade e ao manejo intensivo, que podem acelerar a decomposição da matéria orgânica e a solubilização de suas frações.

Em contraste, os baixos teores de Ácido Fúlvico na Floresta e no PastoILP podem ser atribuídos a diferentes fatores. Em florestas nativas, a matéria orgânica tende a ser mais estável e recalcitrante, com menor proporção de frações mais lábeis como o ácido fúlvico, dependendo da composição da vegetação e das condições edafoclimáticas (Silva et al., 2011). No PastoILP, a variação pode ser influenciada pelo manejo específico da integração, que pode levar a uma maior mineralização ou a um menor aporte de resíduos que formam o ácido fúlvico, especialmente se o componente lavoura for predominante ou se o pastejo for intensivo (Gazolla et al., 2015).

A variação nos teores de ácido fúlvico entre os sistemas de manejo reflete a complexidade das interações entre o uso do solo, a dinâmica da matéria orgânica e a qualidade do solo. Os sistemas de Pasto e Pivô demonstraram maior capacidade de manter ou acumular ácido fúlvico, indicando um potencial

para maior disponibilidade de micronutrientes e atividade biológica. Por outro lado, os sistemas Floresta e PastoILP apresentaram teores mais baixos, o que pode indicar diferentes estratégias de ciclagem de nutrientes ou a necessidade de ajustes no manejo para otimizar a formação de AF. Estudos futuros poderiam investigar a relação entre os teores de AF e a produtividade das culturas, bem como a influência de diferentes práticas de manejo dentro dos sistemas ILP na dinâmica das frações húmicas do solo.

Figura 10: Gráfico da Atividade da Fração Ácido Fúlvico (AF) da MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.



Obs.: CV% = 81,10%; DMS = 2,195. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.3.3 Ácido húmico

A Figura 11 mostra que o sistema de Pasto em Integração Lavoura-Pecuária (PastoILP) apresentou o maior teor de ácido húmico, com uma média de 4,01 g kg⁻¹. Este valor é estatisticamente superior aos demais tratamentos. Em contraste, o sistema de Pasto convencional registrou um teor de 1,69 g kg⁻¹, um valor consideravelmente menor, mas ainda superior aos sistemas de CulturalILP, Pivô e Floresta. A superioridade do PastoILP pode ser atribuída à combinação

de resíduos de culturas e o pastejo animal, que promovem um aporte contínuo de biomassa e estimulam a atividade microbiana, favorecendo a humificação da matéria orgânica (Tadini et al., 2022a,b).

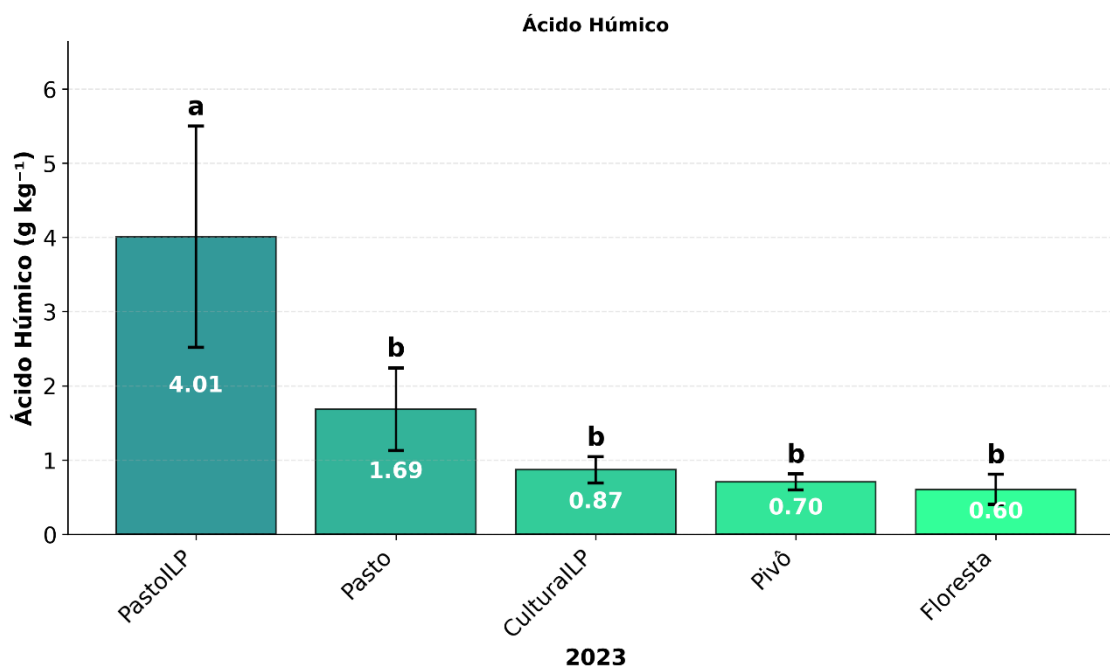
A presença de pastagens, especialmente em sistemas integrados, contribui para a formação de um sistema radicular denso e a deposição de excrementos animais, enriquecendo o solo com precursores de substâncias húmicas (Salton, 2024).

Os sistemas de CulturalLP, Pivô e Floresta apresentaram os menores teores de ácido húmico, com $0,87 \text{ g kg}^{-1}$, $0,70 \text{ g kg}^{-1}$ e $0,60 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, indicam que não há diferença estatística significativa entre eles, mas são todos significativamente inferiores aos observados no PastoLP e Pasto. A baixa concentração de ácido húmico na CulturalLP pode ser explicada pela menor contribuição de biomassa em comparação com o PastoLP, ou por práticas de manejo que podem não otimizar a formação de ácido húmico. No sistema Pivô, a intensificação do cultivo e o revolvimento do solo, mesmo com irrigação, podem acelerar a mineralização da matéria orgânica, reduzindo a estabilidade das frações húmicas (Farias et al., 2025).

Surpreendentemente, a Floresta nativa apresentou o menor teor de ácido húmico, o que pode indicar que, embora seja um sistema com alta produção de biomassa, a dinâmica de decomposição e humificação pode ser diferente ou que a metodologia de extração pode ter capturado frações distintas em comparação com os sistemas agrícolas (Alcântara et al., 2024).

Os resultados demonstram a eficácia dos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária, particularmente o PastoLP, na promoção da acumulação de ácido húmico no solo, um indicador robusto de sua qualidade e saúde. A gestão integrada, que combina componentes agrícolas e pecuários, oferece um caminho promissor para a sustentabilidade dos solos, contrastando com sistemas mais convencionais ou mesmo florestais, que podem apresentar menores teores de ácido húmico sob as condições estudadas. A compreensão dessas dinâmicas é crucial para o desenvolvimento de estratégias de manejo que visem à conservação e ao aumento da capacidade produtiva dos ecossistemas agrícolas (Tadini et al., 2022a,b).

Figura 11: Gráfico da Atividade da Fração Ácido Húmico (AH) da MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancheira-SP para o ano de 2023.



Obs.: CV (%): 125,17; DMS: 2,29. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.3.4 Fração humina

A análise da Figura 12 mostra os teores de Humina em 2022, o maior teor foi observado no Pasto (8,0 g kg⁻¹), diferindo estatisticamente apenas do Pivô (3,5 g kg⁻¹), que apresentou a menor média. Entre os tratamentos intermediários (Floresta, CulturalILP e PastoILP), não foram detectadas diferenças significativas entre si, variando de 5,1 a 6,0 g kg⁻¹. Em 2023, a Floresta (6,6 g kg⁻¹) apresentou maior conteúdo de humina, diferindo estatisticamente do Pivô (4,5 g kg⁻¹), enquanto os demais sistemas não apresentaram diferenças significativas entre si. Estes resultados evidenciam que sistemas com menor revolvimento do solo e cobertura permanente favorecem o acúmulo de frações orgânicas mais recalcitrantes, enquanto o manejo convencional irrigado reduz a estabilização da matéria orgânica (Ribon et al., 2023; Silva et al., 2023a).

Os sistemas perenes, representados por Pasto e Floresta, demonstraram capacidade equivalente de manter estoques elevados de humina, não diferindo

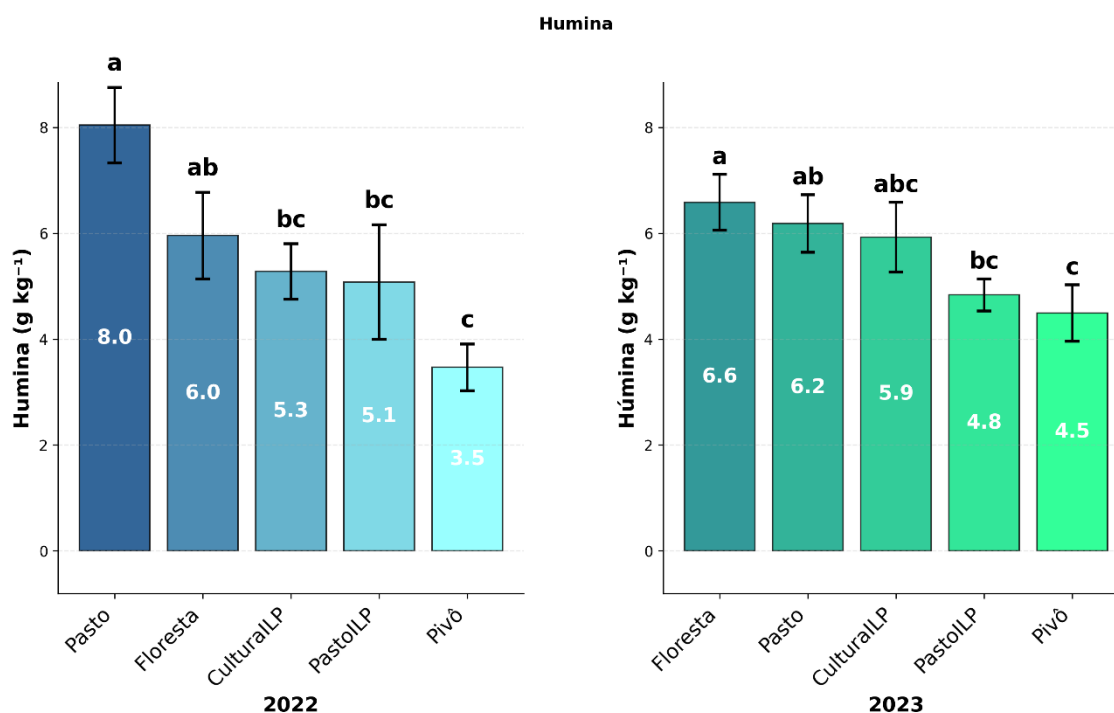
estatisticamente entre si em ambos os anos avaliados. O sistema radicular fasciculado das gramíneas forrageiras promove contínua deposição de material orgânico, especialmente através da renovação radicular, processo que favorece as interações organominerais e a formação de agregados estáveis. A literatura recente corrobora que pastagens bem manejadas podem atingir ou mesmo superar os estoques de carbono de ecossistemas florestais nativos, particularmente nas frações mais estáveis da matéria orgânica. Esta equivalência estatística entre pastagem e floresta sugere que o manejo adequado de sistemas pecuários pode representar uma estratégia eficiente para o sequestro de carbono no solo (Backes et al., 2023; Ribon et al., 2023).

Os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (CulturalLP e PastoILP) apresentaram comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente nem dos sistemas Pasto e Floresta nem do sistema Pivô na maioria das comparações realizadas. Em 2022, ambos os sistemas ILP apresentaram valores médios de humina (5,3 e 5,1 g kg⁻¹, respectivamente) superiores ao sistema irrigado convencional, porém sem significância estatística. Em 2023, manteve-se a tendência, com CulturalLP (5,9 g kg⁻¹) apresentando valor numericamente superior ao PastoILP (4,8 g kg⁻¹). Esta posição intermediária dos sistemas integrados reflete o período de transição e adaptação, onde os benefícios da diversificação de culturas e da redução do revolvimento ainda não se consolidaram completamente na estabilização das frações húmicas mais recalcitrantes (Silva et al., 2023a).

A consistente inferioridade do sistema Pivô em relação aos sistemas conservacionistas, mantida em ambos os anos, evidencia os efeitos deletérios do manejo convencional sobre a estabilidade da matéria orgânica do solo. O preparo intensivo do solo promove a quebra de agregados e acelera a mineralização da matéria orgânica, reduzindo especificamente as frações mais estáveis como a humina. A amplitude observada entre o sistema com maior teor de humina (8,0 g kg⁻¹ no Pasto em 2022) e o menor (3,5 g kg⁻¹ no Pivô no mesmo ano) representa uma diferença de 56%, demonstrando o impacto significativo das práticas de manejo sobre a dinâmica do carbono recalcitrante. Estudos recentes confirmam que a adoção de práticas com sistemas integrados pode reverter perdas de carbono e restabelecer a estabilidade das frações húmicas, embora este processo

demande tempo considerável para se consolidar (Backes et al., 2023; Silva et al., 2023a).

Figura 12: Gráfico da Atividade da Fração Humina (HU) da MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV (%): 33,95; DMS: 2,40; 2023: CV (%): 24,14; DMS: 1,48. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.3.5 Carbono da biomassa microbiana

Com base na Figura 13 o carbono da biomassa microbiana, em 2023, apresentou maiores valores no sistema Pasto (181,77 mg C kg⁻¹) e Floresta (172,93 mg C kg⁻¹), enquanto PastoILP (113,76 mg C kg⁻¹), Pivô (87,47 mg C kg⁻¹) e CulturalLP (84,56 mg C kg⁻¹) apresentaram os menores teores. Do ponto de vista estatístico, Pasto e Floresta não diferiram entre si, mas ambos diferiram de PastoILP, Pivô e CulturalLP; por sua vez, PastoILP, Pivô e CulturalLP não diferiram entre si. Esse padrão é consistente com o entendimento de que ambientes com cobertura permanente e maior aporte orgânico contínuo tendem a sustentar maior biomassa microbiana, ao passo que manejos mais intensivos ou com menor qualidade/continuidade de aporte de resíduos reduzem o pool

microbiano (Damiana et al., 2021; Rego et al., 2023).

A superioridade de Pasto e Floresta em relação aos demais tratamentos podem ser explicada por mecanismos ecológicos e físico-químicos do solo: maior estabilidade de agregados, maior aporte de carbono lábil pela rizodeposição e maior diversidade de substratos orgânicos ao longo do tempo, fatores que sustentam uma comunidade microbiana mais abundante. Numericamente, o Carbono da Biomassa Microbiana do Pasto foi cerca de 2,1 vezes maior que o do Pivô (181,77 vs. 87,47 mg C kg⁻¹) e superou amplamente a CulturalLP (181,77 vs. 84,56 mg C kg⁻¹). A Floresta exibiu magnitude similar, com diferença absoluta de 85,46 mg C kg⁻¹ em relação ao Pivô (172,93 – 87,47). Trabalhos recentes em sistemas tropicais e subtropicais reportam que pastagens bem manejadas e áreas nativas frequentemente mantêm maiores valores de biomassa e atividade microbiana, em função da entrada contínua de carbono e do microclima edáfico mais estável (Rego et al., 2023; Sarto et al., 2020).

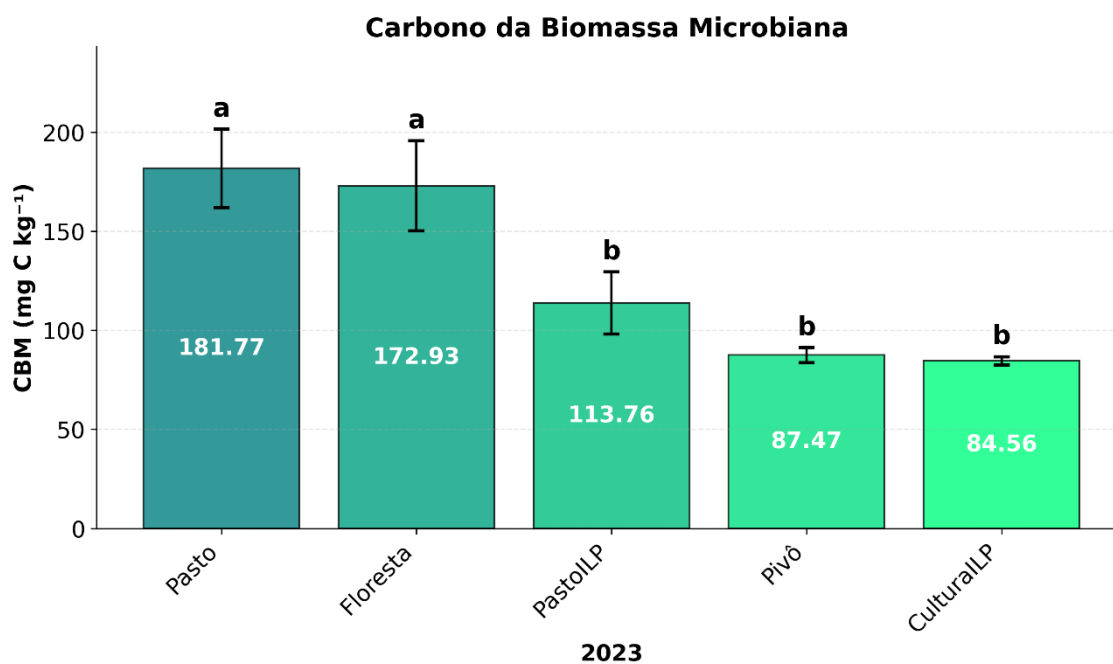
Os sistemas integrados e os sistemas de cultivo avaliados aqui (PastoILP, CulturalLP e Pivô) compuseram um grupo estatisticamente semelhante e inferior ao grupo Pasto/Floresta, apesar de diferenças numéricas internas. Em particular, o PastoILP apresentou CBM 30% maior que o Pivô (113,76 vs. 87,47 mg C kg⁻¹) e 34% maior que a CulturalLP (113,76 vs. 84,56 mg C kg⁻¹), porém sem evidência estatística de separação entre esses três manejos neste recorte.

Essa resposta pode ocorrer quando o tempo de adoção do sistema integrado ainda é insuficiente para alterar de forma robusta o tamanho do pool microbiano, ou quando o balanço entre perturbação do solo, disponibilidade hídrica, qualidade do resíduo e sazonalidade de aportes limita o acúmulo de biomassa microbiana. A literatura aponta que o efeito de ILP/ILPF sobre atributos biológicos do solo é fortemente dependente de histórico, intensidade de pastejo, rotação, adubação e manutenção de palhada, podendo demandar anos para se expressar plenamente (Rego et al., 2023; Schiavo et al., 2025).

Os resultados de 2023 indicam dois comportamentos bem definidos: (i) Pasto e Floresta com CBM elevado e estatisticamente equivalente; (ii) PastoILP, Pivô e CulturalLP com CBM reduzido e estatisticamente equivalente entre si. Como o CBM é um indicador de rápida resposta e fortemente influenciado por

condições imediatas (umidade, temperatura, disponibilidade de substrato), a interpretação técnica deve considerar que diferenças de manejo que aumentem entrada e proteção de carbono (cobertura permanente, diversidade de plantas, redução de revolvimento, maior rizodeposição) tendem a favorecer CBM e, consequentemente, a ciclagem de nutrientes. Estudos recentes em solos brasileiros e modelagens de intensificação sustentável reforçam que melhorias de manejo em pastagens e sistemas integrados podem elevar CBM e estoques de C ao longo do tempo, mas a magnitude do ganho depende do desenho do sistema e do tempo de consolidação (Damiana et al., 2021; Rego et al., 2023).

Figura 13: Gráfico da Atividade Enzimática do Carbono da Biomassa Microbiana na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rانcharia-SP para o ano de 2023.



Obs.: CV% = 41,23; DMS = 45,23. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.3.6 Desidrogenase

A atividade da desidrogenase (Figura 14) apresentada no gráfico destaca diferenças claras entre manejos e anos, com valores em 2022 variando de 4,7 a 10,3 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1} e, em 2023, de 8,1 a 14,5 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1} . Em 2022, Pasto (10,3 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}), PastoILP (9,3 μg de

TPF g^{-1} de solo h^{-1}) e Pivô (9,1 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}) apresentaram os maiores níveis de atividade e não diferiram estatisticamente entre si, ao passo que Floresta (5,3 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}) e CulturalLP (4,7 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}) formaram um grupo com menor atividade, sem diferença estatística entre si, porém diferindo estatisticamente do grupo de maior atividade.

Em 2023, o Pasto (14,5 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}) apresentou a maior atividade e diferiu estatisticamente de PastoLP (9,8 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}), Pivô (9,6 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}), CulturalLP (9,0 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}) e Floresta (8,1 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}); entre estes quatro últimos, não houve diferenças estatísticas. Esse comportamento é consistente com evidências de que enzimas oxido redutases respondem rapidamente à disponibilidade de substrato, ao microclima do solo e à intensidade de perturbação, sendo sensíveis a mudanças de manejo e sazonalidade (Costa et al., 2024; Valani et al., 2021).

Em 2022, chama atenção a separação estatística entre dois conjuntos: (i) Pasto/PastoLP/Pivô com atividade elevada (aproximadamente 9,1–10,3 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}) e (ii) Floresta/CulturalLP com atividade reduzida (entre 4,7 e 5,3 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}). Numericamente, o Pasto apresentou atividade cerca de 95% maior que a CulturalLP (10,3 vs. 4,7 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}), e a diferença absoluta entre Pasto e Floresta foi de 5,0 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1} .

Embora frequentemente áreas nativas sustentem alta atividade biológica, a desidrogenase pode diminuir quando há menor entrada de carbono lábil disponível no curto prazo, maior proporção de carbono recalcitrante e/ou condições microclimáticas específicas no momento da amostragem, pois o método capta atividade metabólica potencial e é bastante sensível a umidade e temperatura (Costa et al., 2024). Em sistemas com pastagens, a rizodeposição e a renovação radicular podem intensificar o fornecimento de compostos facilmente assimiláveis, elevando a atividade enzimática (Valani et al., 2021).

Em 2023, o Pasto destacou-se com 14,5 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1} , aproximadamente 48% acima do PastoLP (9,8 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}) e 79% acima da Floresta (8,1 μg de TPF g^{-1} de solo h^{-1}). Do ponto de vista estatístico, isso indica que a pastagem, nas condições avaliadas, sustentou um nível de metabolismo microbiano significativamente superior ao observado nos demais

manejos naquele ano.

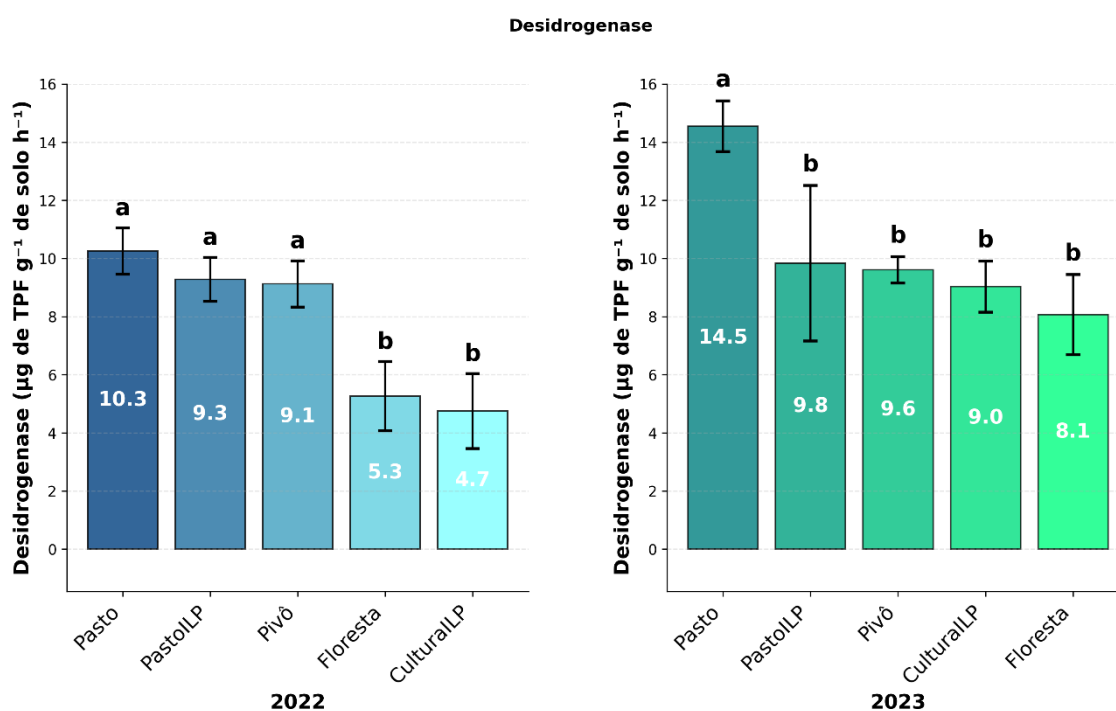
Em contrapartida, PastoLP, Pivô, CulturalLP e Floresta apresentaram valores intermediários/próximos ($8,1\text{--}9,8 \mu\text{g}$ de TPF g^{-1} de solo h^{-1}) e estatisticamente equivalentes, sugerindo que diferenças numéricas entre eles não foram suficientemente grandes (considerando a variabilidade experimental) para se traduzirem em separação estatística.

Estudos recentes reforçam que sistemas integrados e práticas conservacionistas podem melhorar atributos biológicos, mas a magnitude e o tempo de resposta variam conforme desenho do sistema, histórico de uso, intensidade de pastejo, adubação, palhada e regime hídrico, e a sazonalidade pode ampliar ou mascarar diferenças (Costa et al., 2024; Valani et al., 2021).

A comparação entre anos, embora não deva ser tratada como diferença estatística temporal sem um modelo específico (ano \times tratamento), indica aumento numérico generalizado da desidrogenase em 2023: por exemplo, Pasto passou de $10,3$ para $14,5 \mu\text{g}$ de TPF g^{-1} de solo h^{-1} (+4,2), Pivô de $9,1$ para $9,6 \mu\text{g}$ de TPF g^{-1} de solo h^{-1} (+0,5) e CulturalLP de $4,7$ para $9,0 \mu\text{g}$ de TPF g^{-1} de solo h^{-1} (+4,3). Esse incremento pode refletir condições ambientais mais favoráveis à atividade microbiana (umidade/temperatura), maior disponibilidade de substratos recentes e/ou efeitos cumulativos do manejo.

Em termos de interpretação funcional, valores mais altos de desidrogenase sugerem maior intensidade de processos biológicos associados à respiração microbiana e à transformação de nutrientes; contudo, a inferência causal deve ser feita com cautela e idealmente acompanhada de outras métricas (CBM, respiração basal, quocientes metabólicos, fracionamento de C, etc.) para uma leitura integrada da qualidade biológica do solo (Costa et al., 2024; Valani et al., 2021).

Figura 14: Gráfico da Atividade Enzimática da Desidrogenase (DNASE) na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rانcharia-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV (%): 35,69; DMS: 3,45; 2023: CV (%): 36,96; DMS: 3,71. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.3.7 Fluoresceína diacetato

De acordo com a Figura 15 os dados de fluoresceína diacetato variaram de acordo com as épocas, em 2022, de 64,1 a 115,4 $\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1} e, em 2023, de 46,7 a 104,5 $\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1} . Em 2022, Floresta (115,4 $\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1}) e PastoILP (102,7 $\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1}) apresentaram as maiores médias e não diferiram estatisticamente entre si; além disso, Pasto (93,3 $\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1}) não diferiu estatisticamente de Floresta e de PastoILP. Em contraste, Pivô (64,1 $\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1}) apresentou a menor média e diferiu estatisticamente de Floresta e de PastoILP, mas não diferiu estatisticamente de CulturalILP (68,4 $\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1}). Esse comportamento é coerente com a literatura que descreve a FDA como sensível ao aporte de resíduos, ao microclima e ao nível de perturbação, refletindo mudanças no metabolismo e na produção de enzimas associadas à

decomposição (Barbosa et al., 2023; Costa et al., 2024).

Em 2023, observou-se um reordenamento parcial entre os tratamentos, com PastoLP (104,5 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1}) apresentando a maior média e não diferindo estatisticamente de Floresta (95,1 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1}). O Pasto (79,2 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1}) apresentou valor intermediário e diferiu estatisticamente de CulturalLP (50,2 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1}) e de Pivô (46,7 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1}), que compuseram o grupo de menor atividade e não diferiram estatisticamente entre si.

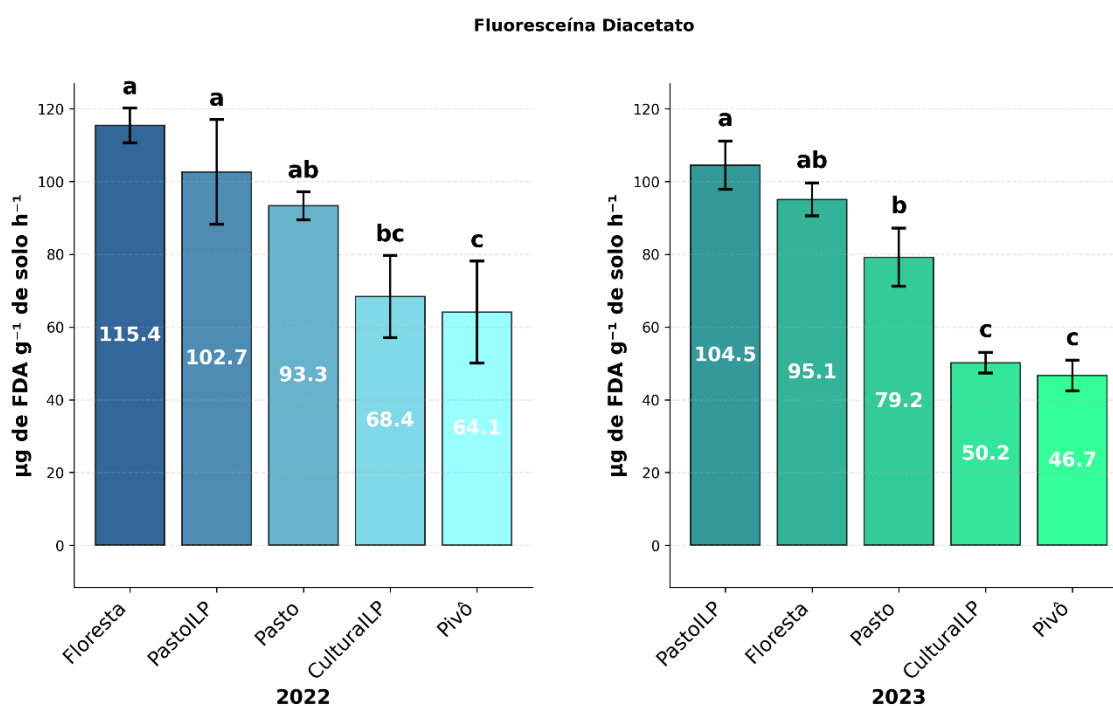
Numericamente, a diferença entre PastoLP e Pivô foi de 57,8 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1} , indicando redução expressiva do potencial enzimático global nos sistemas com menores médias. Em termos mecanísticos, maior cobertura do solo e aporte orgânico (serapilheira, palhada e raízes) tendem a sustentar maior produção e estabilização de enzimas no ambiente edáfico, elevando a taxa de hidrólise de FDA (Barbosa et al., 2023).

Ao comparar o desempenho relativo dos sistemas, a Floresta manteve-se entre os tratamentos com maior atividade em ambos os anos (115,4 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1} em 2022; 95,1 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1} em 2023), o que é compatível com ambientes que apresentam maior diversidade de entradas de carbono e micro-habitats, favorecendo diversidade funcional microbiana. O PastoLP também apresentou atividade elevada e estatisticamente semelhante à Floresta em 2023, sugerindo que, sob determinadas condições de manejo e disponibilidade de substrato, sistemas integrados podem sustentar níveis de atividade enzimática global comparáveis aos de áreas de referência. Por outro lado, CulturalLP e Pivô concentraram os menores valores em 2023 (50,2 e 46,7 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1} , respectivamente), sem distinção estatística entre si, o que indica limitação do metabolismo enzimático global possivelmente associada à menor continuidade de aporte orgânico e/ou condições ambientais menos favoráveis à atividade microbiana no momento da avaliação (Costa et al., 2024; Valani et al., 2021).

A análise temporal sugere redução numérica da atividade de FDA do conjunto 2022 para 2023 em vários tratamentos (p.ex., Floresta de 115,4 para 95,1 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1} ; Pasto de 93,3 para 79,2 μg de FDA g^{-1} de

solo h^{-1} ; Pivô de 64,1 para 46,7 μg de FDA g^{-1} de solo h^{-1}). Entretanto, sem um teste estatístico que compare explicitamente os anos (modelo com efeito de ano e interação ano versus tratamento), essa comparação deve ser interpretada apenas como tendência numérica, potencialmente explicada por sazonalidade (umidade/temperatura), variações de substrato disponível e condições de incubação/extração do método. Estudos recentes mostram que indicadores enzimáticos apresentam forte variabilidade sazonal em ambientes tropicais e que sistemas conservacionistas e integrados podem amortecer parte dessa variabilidade, mas os efeitos dependem do histórico e do arranjo de manejo (Costa et al., 2024; Valani et al., 2021).

Figura 15: Gráfico da Atividade Enzimática da FDA na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV% = 28,98; DMS = 28,68; 2023: CV (%): 35,02; DMS: 18,11. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.3.8 Glicosidase

A atividade da enzima β -glicosidase (Figura 16) nos gráficos variou em 2022 de 65,1 a 179,1 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} e em 2023 de 109,5 a 242,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} . Em 2022, CulturalLP (179,1 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}),

Pasto (171,7 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), PastoILP (150,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e Pivô (140,2 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) não diferiram estatisticamente entre si, enquanto a Floresta (65,1 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) apresentou a menor atividade e diferiu estatisticamente de todos esses quatro tratamentos. Em 2023, Pasto (242,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e PastoILP (242,2 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) apresentaram as maiores médias e não diferiram estatisticamente entre si, mas diferiram estatisticamente de Pivô (141,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), CulturalILP (138,6 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e Floresta (109,5 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}); entre esses três últimos, não houve diferença estatística. Esse padrão é compatível com a literatura, que relaciona a β -glicosidase à dinâmica de carbono lábil, à qualidade dos resíduos e ao microambiente gerado pelo manejo (Barbosa et al., 2023; Carvalho et al., 2024).

Em 2022, a separação estatística foi marcada pela redução pronunciada na Floresta (65,1 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), frente a valores elevados e estatisticamente semelhantes nos demais sistemas (140,2 a 179,1 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}). Numericamente, a CulturalILP (179,1 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) foi cerca de 2,75 vezes maior que a Floresta (65,1 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), e o Pasto (171,7 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) foi aproximadamente 2,64 vezes maior que a Floresta.

Embora áreas nativas frequentemente apresentem elevada diversidade microbiana, a atividade enzimática específica pode ser menor quando há maior proporção de carbono mais recalcitrante, maior limitação de substratos prontamente hidrolisáveis e/ou condições microclimáticas na coleta que reduzam a expressão de enzimas ligadas ao consumo de carboidratos simples e intermediários. Assim, o resultado sugere um ambiente com menor pulso de decomposição de carboidratos facilmente acessíveis no momento avaliado, mais do que uma inferência generalizante sobre qualidade sem o suporte de outras métricas (Barbosa et al., 2023).

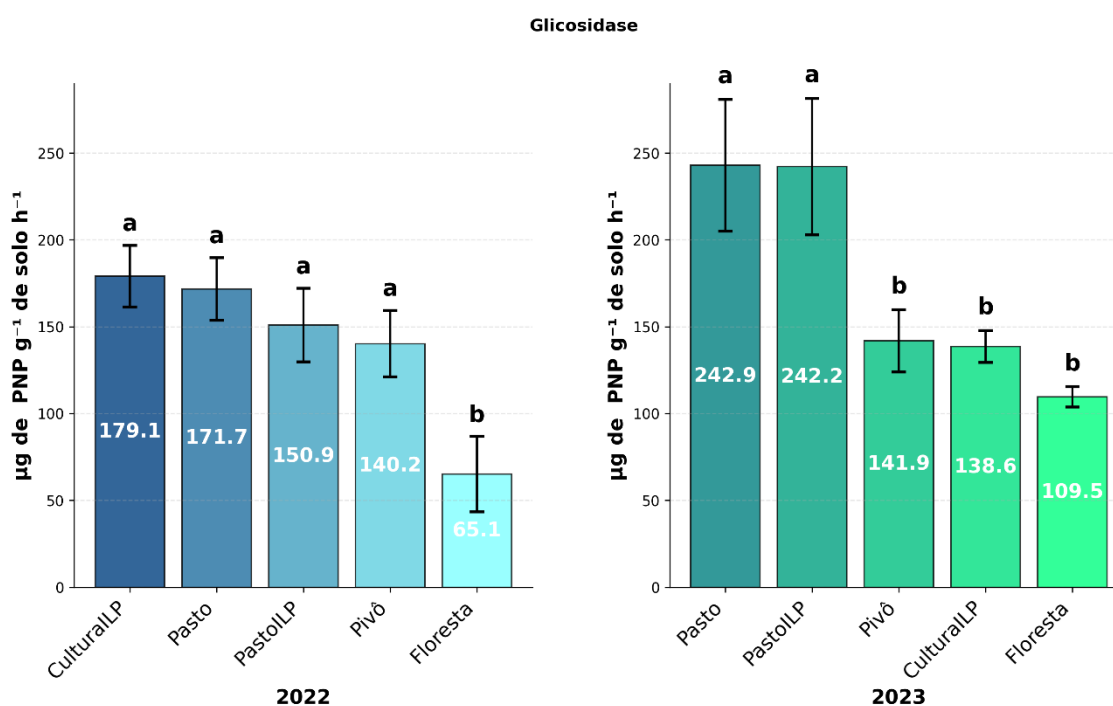
Em 2023, o destaque foi o aumento e a superioridade estatística de Pasto (242,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e PastoILP (242,2 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) em relação aos demais tratamentos, indicando maior potencial de transformação de carbono de origem vegetal e maior oferta de energia para

a microbiota. A diferença absoluta entre Pasto (242,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e Floresta (109,5 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) foi de 133,4 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} , e, em termos relativos, Pasto foi cerca de 2,22 vezes superior à Floresta. Já Pivô (141,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e CulturalLP (138,6 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) permaneceram em nível intermediário e estatisticamente semelhante ao da Floresta (109,5 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), sugerindo que, neste ano, as diferenças numéricas entre esses três não foram suficientes para indicar mudanças robustas na capacidade de hidrólise de substratos relacionados ao ciclo do C. Evidências em sistemas integrados de longo prazo indicam que atributos bioquímicos (incluindo enzimas do ciclo do C) respondem à composição botânica, rotação e manejo de resíduos, com respostas dependentes do tempo de adoção e do ambiente edafoclimático (Carvalho et al., 2024; Valani et al., 2021).

A comparação entre anos deve ser tratada como tendência numérica (e não como diferença estatística temporal) porque os gráficos indicam testes de médias dentro de cada ano. Ainda assim, observa-se incremento expressivo de 2022 para 2023 em Pasto (de 171,7 para 242,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} , com aumento de 71,2 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), PastoLP (de 150,9 para 242,2 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} , com aumento de 91,3 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e Pivô (de 140,2 para 141,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} , aumentando 1,7 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), além de aumento em Floresta (de 65,1 para 109,5 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} , com aumento de 44,4 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}).

Como a β -glicosidase é fortemente influenciada por umidade, temperatura, aporte de resíduos e dinâmica de raízes, variações sazonais e de manejo no período antecedente à amostragem podem explicar parte dessas mudanças numéricas. Estudos recentes ressaltam que indicadores enzimáticos são úteis para discriminar função biogeoquímica e capacidade de ciclagem, mas devem ser interpretados conjuntamente com carbono orgânico, biomassa microbiana e outros marcadores para sustentar conclusões mais abrangentes (Barbosa et al., 2023; Carvalho et al., 2024).

Figura 16: Gráfico da Atividade Enzimática da Glicosidase (GLI) na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancheira-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV% = 36,01; DMS = 71,35; NMS = 2545,08. 2023: CV% = 44,77; DMS = 74,97. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.3.9 Arilsulfatase

De acordo com a Figura 17 a atividade da arilsulfatase evidenciou forte efeito de uso/manejo em ambos os anos, com valores em 2022 variando de 43,2 a 230,8 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹ e, em 2023, de 42,1 a 153,8 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹. Em 2022, o Pasto (230,8 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) apresentou a maior atividade e diferiu estatisticamente de todos os demais tratamentos; a Floresta (184,4 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) foi intermediária e diferiu estatisticamente de PastoLLP (104,3 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹), CulturalLP (66,6 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) e Pivô (43,2 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹). Ainda em 2022, CulturalLP (66,6 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) e Pivô (43,2 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) não diferiram estatisticamente entre si, enquanto PastoLLP (104,3 µg de PNP g⁻¹ de solo h⁻¹) diferiu estatisticamente desses dois. Esse padrão está alinhado com sínteses recentes que posicionam a arilsulfatase como indicador sensível

de matéria orgânica, atividade microbiana e manejo, refletindo alterações no metabolismo e na ciclagem de nutrientes em diferentes usos do solo (Barbosa et al., 2023; Valani et al., 2021).

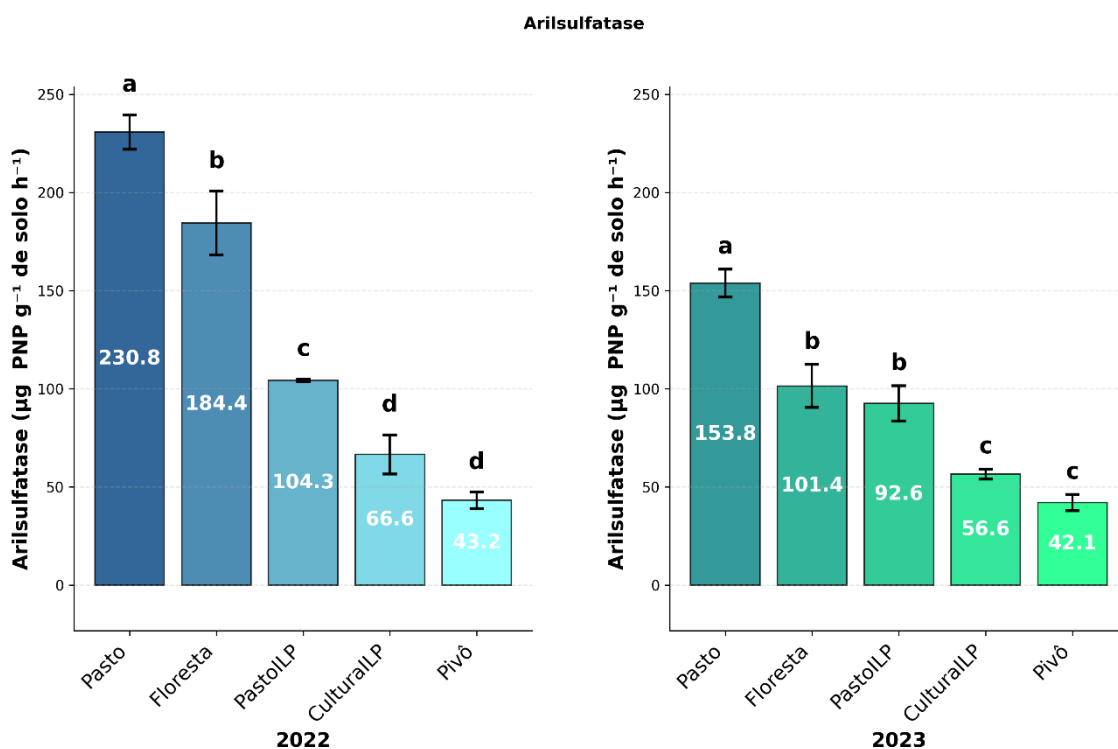
Os resultados de 2022 sugerem um gradiente funcional claro: Pasto com atividade máxima, seguido por Floresta, e depois os sistemas agrícolas, com Pivô exibindo o menor nível. Numericamente, a diferença absoluta entre Pasto (230,8 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e Pivô (43,2 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) foi de 187,6 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} , indicando forte contraste no potencial de mineralização de S orgânico. Em termos relativos, Pasto apresentou atividade cerca de 5,3 vezes maior que Pivô e aproximadamente 2,2 vezes maior que PastoLP (230,8 vs. 104,3 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}). Como a arilsulfatase tende a aumentar com maior aporte de resíduos e maior biomassa/atividade microbiana, valores elevados em pastagem podem refletir entrada contínua de carbono e S orgânico via serapilheira e, sobretudo, via raízes e exsudatos, criando microambientes favoráveis à síntese e estabilização de enzimas (Arthur et al., 2025; Barbosa et al., 2023).

Em 2023, o Pasto (153,8 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) permaneceu como o tratamento de maior atividade e diferiu estatisticamente dos demais. A Floresta (101,4 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e o PastoLP (92,6 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) apresentaram valores intermediários e não diferiram estatisticamente entre si, mas ambos diferiram estatisticamente de CulturalLP (56,6 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e Pivô (42,1 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), que compuseram o grupo de menor atividade e não diferiram estatisticamente entre si. Esse arranjo indica que, em 2023, a integração com pastagem (PastoLP) aproximou-se do comportamento da Floresta para esse indicador, enquanto os sistemas agrícolas com menor média mantiveram limitação do potencial enzimático ligado ao ciclo do S. Evidências recentes em sistemas integrados mostram que atributos bioquímicos e enzimáticos respondem ao manejo de resíduos, rotação e acúmulo de matéria orgânica, com ganhos mais consistentes quando há manutenção de cobertura e aportes diversificados ao solo (Ribon et al., 2025; Valani et al., 2021).

Ocorreu redução numérica generalizada de 2022 para 2023. O Pasto caiu de 230,8 para 153,8 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} (decréscimo de 77,0 μg de

PNP g^{-1} de solo h^{-1}), Floresta de 184,4 para 101,4 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} (decréscimo de 83,0 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e PastoLP de 104,3 para 92,6 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} (decréscimo de 11,7 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}). Essa variação interanual é plausível porque atividades enzimáticas são fortemente moduladas por umidade, temperatura, disponibilidade de substrato e dinâmica de raízes, além de efeitos de curto prazo do manejo. Assim, os dados sustentam, de maneira técnica e sem extrapolações, que Pasto apresentou consistentemente o maior potencial de mineralização de S orgânico, enquanto CulturalLP e Pivô se mantiveram nos menores patamares, e a Floresta e o PastoLP ocuparam posição intermediária, com equivalência estatística entre si em 2023 (Arthur et al., 2025; Barbosa et al., 2023).

Figura 17: Gráfico da Atividade Enzimática da Arilsulfatase na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancheira-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV (%): 59,48; DMS: 32,78; 2023: CV (%): 44,77; DMS: 74,97. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

7.3.10 Fosfatase

A amplitude da atividade fosfatase (Figura 18) em 2022 de 81,0 a 219,2 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} e, em 2023, de 95,8 a 183,7 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} . Em 2022, a Floresta (219,2 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) apresentou a maior média e diferiu estatisticamente de todos os demais tratamentos, evidenciando maior potencial de mineralização de P orgânico sob vegetação nativa.

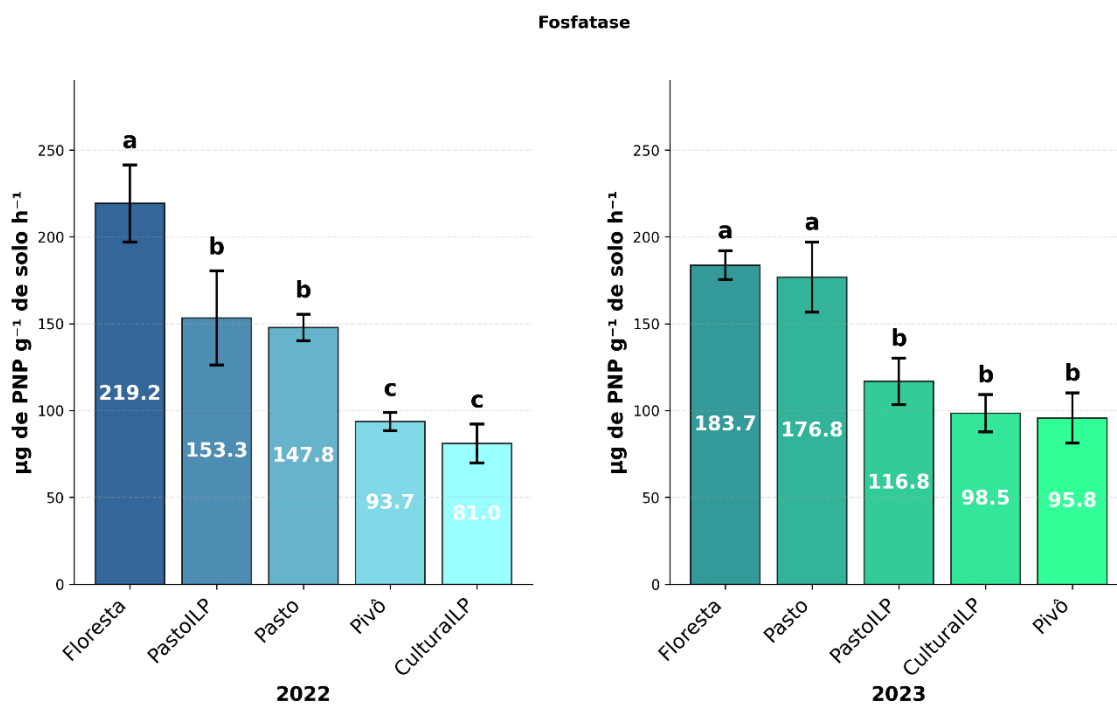
Ainda em 2022, observou-se um grupo intermediário composto por PastoLP (153,3 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e Pasto (147,8 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), que não diferiram estatisticamente entre si; ambos, porém, diferiram estatisticamente de Pivô (93,7 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e CulturalLP (81,0 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), que compuseram o grupo de menor atividade e não diferiram estatisticamente entre si. Numericamente, a Floresta superou o Pivô em 125,5 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} (219,2 – 93,7) e a CulturalLP em 138,2 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} (219,2 – 81,0), contrastes compatíveis com maior acúmulo de matéria orgânica, maior diversidade de entradas de resíduos e maior estabilidade do microambiente edáfico em áreas nativas, fatores frequentemente associados ao aumento de enzimas envolvidas na ciclagem de nutrientes (Barbosa, 2020; Barbosa et al., 2023; Silva et al., 2023a; Valani et al., 2021).

Em 2023, a Floresta (183,7 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) manteve-se entre os maiores valores e não diferiu estatisticamente do Pasto (176,8 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), indicando equivalência estatística entre esses dois usos quanto ao potencial de mineralização de P orgânico naquele ano. Ambos diferiram estatisticamente de PastoLP (116,8 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), CulturalLP (98,5 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e Pivô (95,8 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), que não diferiram estatisticamente entre si. A diferença absoluta entre Floresta e Pivô em 2023 foi de 87,9 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} (183,7 – 95,8), e entre Pasto e Pivô foi de 81,0 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1} (176,8 – 95,8), reforçando que os sistemas com maior continuidade de cobertura e aporte orgânico tenderam a apresentar maior atividade de fosfatase (Barbosa et al., 2023; Valani et al., 2021).

A comparação entre anos deve ser tratada como tendência numérica, pois as estatísticas do gráfico se referem às comparações entre tratamentos dentro de cada ano. Mesmo assim, nota-se redução numérica na Floresta (de

219,2 para 183,7 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}) e aumento numérico em Pasto (de 147,8 para 176,8 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}), além de elevação numérica em CulturalLP (de 81,0 para 98,5 μg de PNP g^{-1} de solo h^{-1}). Essas oscilações são plausíveis dado o caráter dinâmico das enzimas do solo, moduladas por umidade/temperatura, fenologia e aporte recente de resíduos e raízes, além de variações na disponibilidade de P e no pH, que podem induzir maior ou menor síntese/atividade de fosfatases. Em termos de implicação funcional, os dados sustentam que a vegetação nativa e a pastagem apresentaram maior potencial de ciclagem de P via enzimática em 2023, enquanto sistemas agrícolas avaliados se mantiveram em patamar inferior e estatisticamente semelhante entre si, sugerindo menor capacidade relativa de mineralização de P orgânico no momento amostrado (Barbosa et al., 2023; Silva et al., 2023a).

Figura 18: Gráfico da Atividade Enzimática da Fosfatase na MOS em cinco diferentes usos da terra. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para os anos de 2022 e 2023.



Obs.: 2022: CV% = 40,80; DMS = 52,37; 2023: CV (%): 36,07; DMS: 37,15. Onde: CV - Coeficiente de Variação; DMS - Diferença Mínima Significativa.

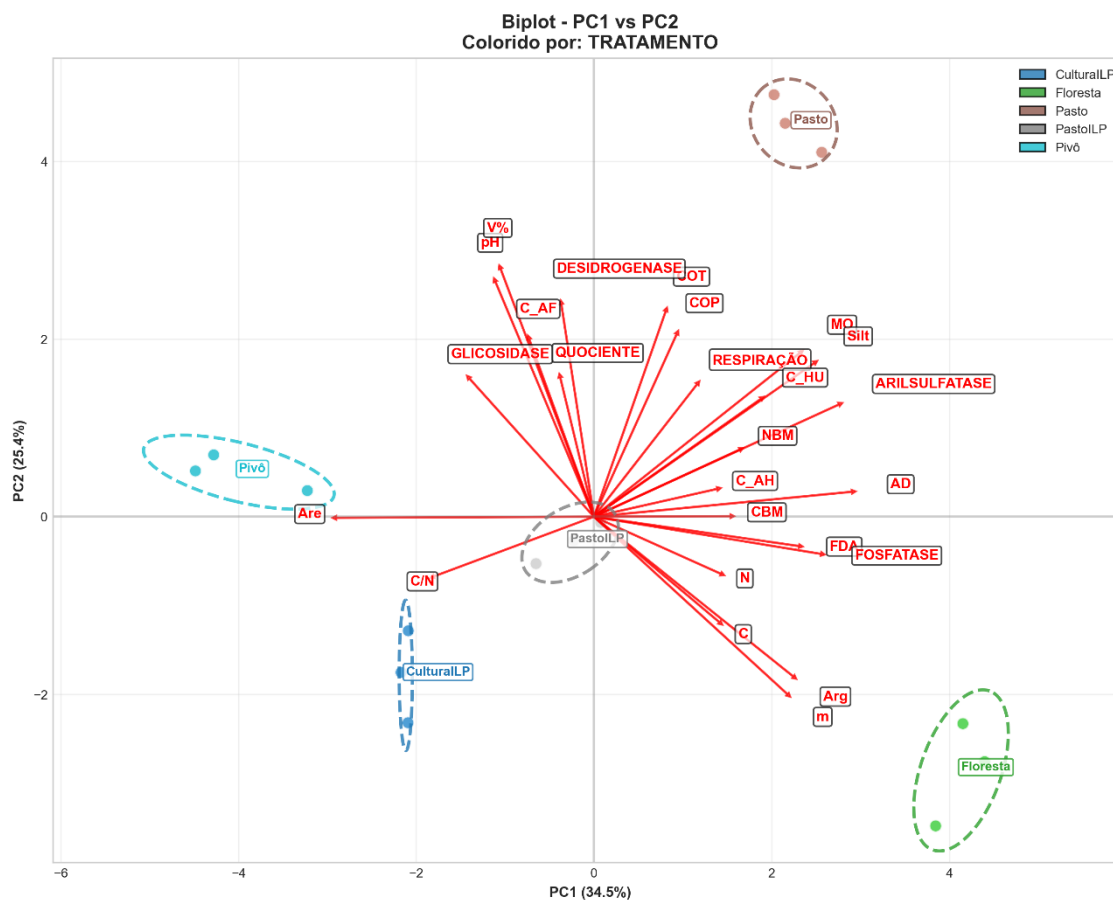
7.3.11 Análise de Componentes Principais para o anos de 2022 (PCAs)

A Figura 19 da PCA mostra que o PC1 (34,5%) representa, majoritariamente, um gradiente integrado de capacidade física/hídrica do solo e funcionamento biológico associado, enquanto o PC2 (25,4%) captura variações secundárias ligadas a condições químicas e a alguns componentes do metabolismo microbiano. No PC1, destacam-se cargas positivas altas para AD (0,967), arilsulfatase (0,918), fosfatase (0,851), silte (0,826), MO (0,772), FDA (0,769), argila (0,748), além de associações moderadas com m% (0,726), C_HU (0,625), NBM (0,546) e CBM (0,511). Em contraste, as cargas negativas mais expressivas são areia (-0,966), C/N (-0,599) e glicosidase (-0,466), seguidas por pH (-0,369) e V% (-0,350). Em termos interpretativos, esse padrão sugere que, à medida que aumenta a fração fina (silte/argila) e a água disponível (estimada pela textura, conforme o modelo do ZARC), também aumentam variáveis ligadas à atividade enzimática global e à ciclagem de S e P (FDA, arilsulfatase, fosfatase) e, em menor magnitude, os estoques biológicos (CBM, NBM) e a fração mais estável da MOS (C_HU). Relações desse tipo são amplamente coerentes com evidências recentes de que textura e retenção de água modulam o habitat microbiano, a difusão de substratos e a persistência/expressão de enzimas, reforçando o papel de atributos físico-hídricos como organizadores da variabilidade biológica (Costa et al., 2024; Qu et al., 2023).

O biplot PC1 × PC2 (Figura 19) confirma a separação dos tratamentos ao longo desses gradientes. O Pivô se posiciona nitidamente no lado negativo do PC1, próximo ao vetor de areia, refletindo associação com maior caráter arenoso e, por consequência, menor alinhamento com AD, MO e enzimas com cargas positivas no PC1. A Floresta aparece isolada no quadrante com PC1 positivo e PC2 negativo, mais alinhada aos vetores de argila, m%, e também próxima ao vetor de C e N, o que sugere um conjunto de condições edáficas mais relacionado a frações finas e estoques (e/ou acúmulos) de matéria orgânica e nutrientes. Por outro lado, o Pasto está no quadrante com PC1 e PC2 positivos, relativamente próximo aos vetores de MO, silte, respiração, C_HU e, mais externamente, ao vetor de arilsulfatase; isso indica que, dentro do espaço multivariado, o pasto se associa a maior funcionamento microbiano (respiração e enzimas) e a componentes de

MOS, além de maior afinidade com o gradiente de AD. A PastoILP tende a ficar próxima ao centro (próximo à origem), sugerindo condição intermediária/mista, enquanto a CulturalLP se desloca para PC1 negativo e PC2 negativo, próxima ao vetor C/N, indicando que, comparativamente, a variação desse tratamento é mais explicada por mudanças na relação C/N e por menor alinhamento com AD e com o conjunto de enzimas/biomassa que carregam positivamente no PC1. Em sistemas integrados, essa heterogeneidade multivariada é esperada porque a dinâmica sazonal de resíduos, pastejo/cultivo, entradas de C e variações microclimáticas pode reorganizar os indicadores biológicos ao longo do tempo, alterando padrões de associação entre biomassa, enzimas e MOS (Costa et al., 2024; Duarte et al., 2025).

Figura 19: Análise de Componentes Principais (PCA) dos parâmetros analisados em 2022

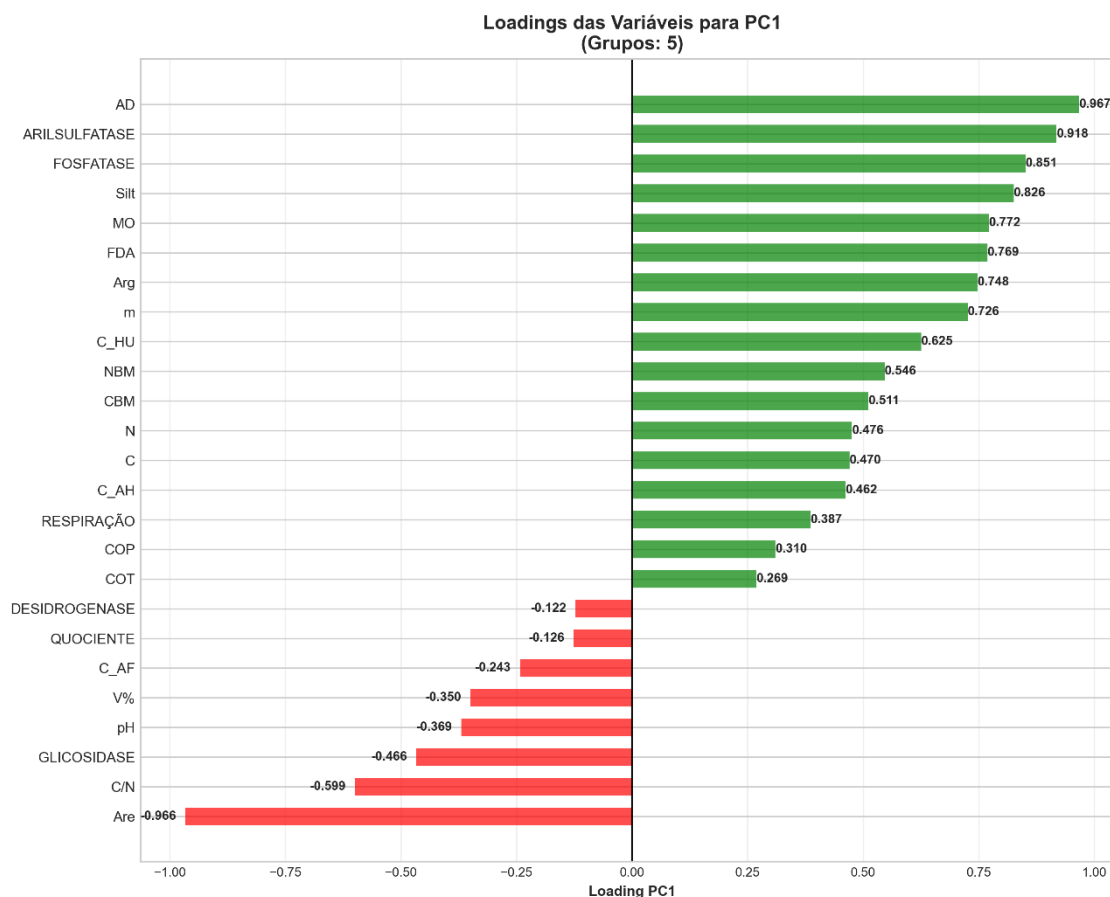


Obs.: PCA apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como co-variáveis: pH - Potencial Hidrogênio Iônico (adimensional); m - Saturação por Alumínio (%); V% - Saturação por Bases (%); MO - Matéria Orgânica (g dm^{-3}); COT - Carbono Orgânico Total (g kg^{-1}); COP - Carbono Orgânico Particulado (g kg^{-1}); C - Carbono da Matéria Orgânica (g kg^{-1}); N - Nitrogênio da Matéria Orgânica (g kg^{-1}); C/N - Relação Carbono/Nitrogênio (adimensional); Arg - Argila (%); Silt - Silte (%); Are - Areia (%); AD - Água Disponível (mm cm^{-1}); CBM - Carbono da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); NBM - Nitrogênio da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); DESIDROGENASE - Atividade da Desidrogenase ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$); RESPIRAÇÃO - Respiração Basal do Solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$); ARILSULFATASE - Atividade da Arilsulfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); FDA - Fluoresceína Diacetato ($\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$); GLICOSIDASE - Atividade da β -Glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); FOSFATASE - Atividade da Fosfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); QUOCIENTE - Quociente Metabólico (qCO_2) ($\text{mg C-CO}_2 \text{g}^{-1} \text{CBM h}^{-1}$); C_AF - Ácido Fúlvico (g kg^{-1}); C_AH - Ácido Húmico (g kg^{-1}); C_HU - Humina (g kg^{-1}).

A Figura 20 destaca que o PC1 opõe fortemente areia ($-0,966$) a AD ($0,967$) e a enzimas-chave (arilsulfatase $0,918$; fosfatase $0,851$; FDA $0,769$),

sugerindo que a textura (e a AD derivada dela) exerce papel estruturante na diferenciação funcional dos ambientes. Isso é consistente com o entendimento atual de que a limitação hídrica e a maior variabilidade de umidade em solos arenosos reduzem a estabilidade do habitat microbiano, afetando biomassa e atividades enzimáticas, sobretudo sob estresse por seca, com impactos sobre ciclagem de C, N, P e S (Qu et al., 2023). Ao mesmo tempo, o fato de glicosidase apresentar carga negativa moderada ($-0,466$) enquanto outras enzimas carregam positivamente indica que diferentes enzimas podem responder de forma distinta aos mesmos gradientes (substrato disponível, proteção física de enzimas em partículas finas, pH, e qualidade do carbono), e que a atividade enzimática não é um bloco único: arilsulfatase/fosfatase/FDA tenderam a acompanhar AD/MO/silte/argila, enquanto glicosidase se associou ao lado oposto do gradiente no conjunto analisado. Essa dissociação também é reportada em abordagens multivariadas de funções do solo, nas quais enzimas podem agrupar-se em eixos funcionais diferentes (ex.: ciclagem de nutrientes vs. armazenamento/estabilidade), variando conforme ambiente e manejo (Arthur et al., 2025).

Figura 20: Gráfico de Barras Divergentes apresentando correlações positivas e negativas dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancheira-SP para o ano de 2022.



Obs.: Gráfico de Barras Divergentes apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como covariáveis no ano de 2022. pH - Potencial Hidrogênio Iônico (adimensional); m - Saturação por Alumínio (%); V% - Saturação por Bases (%); MO - Matéria Orgânica (g dm^{-3}); COT - Carbono Orgânico Total (g kg^{-1}); COP - Carbono Orgânico Particulado (g kg^{-1}); C - Carbono da Matéria Orgânica (g kg^{-1}); N - Nitrogênio da Matéria Orgânica (g kg^{-1}); C/N - Relação Carbono/Nitrogênio (adimensional); Arg - Argila (%); Silt - Silte (%); Are - Areia (%); AD - Água Disponível (mm cm^{-1}); CBM - Carbono da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); NBM - Nitrogênio da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); DESIDROGENASE - Atividade da Desidrogenase ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$); RESPIRAÇÃO - Respiração Basal do Solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$); ARILSULFATASE - Atividade da Arilsulfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); FDA - Fluoresceína Diacetato ($\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$); GLICOSIDASE - Atividade da β -Glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); FOSFATASE - Atividade da Fosfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); QUOCIENTE - Quociente Metabólico (qCO_2) ($\text{mg C-CO}_2 \text{g}^{-1} \text{CBM h}^{-1}$); C_AF - Ácido Fúlvico (g kg^{-1}); C_AH - Ácido Húmico (g kg^{-1}); C_HU - Humina (g kg^{-1}).

Os estudos realizados em 2022 mostram uma estrutura de covariação

e agrupamentos no espaço de componentes. Assim, a evidência aqui é de separação multivariada: Pivô associado ao polo arenoso (PC1 negativo), Floresta separada com PC1 positivo e PC2 negativo, Pasto concentrado com PC1/PC2 positivos, e PastoLP mais central (intermediário).

Esses resultados sustentam uma discussão mecanística em que a AD (0,967) — estimada pela textura — e as frações finas (silte 0,826; argila 0,748) organizam simultaneamente a variação de MOS (MO 0,772; C_HU 0,625; C_AH 0,462) e de indicadores microbiológicos/enzimáticos (FDA 0,769; arilsulfatase 0,918; fosfatase 0,851; CBM 0,511; NBM 0,546; respiração 0,387) e que, em termos aplicados, dão suporte à sua estratégia de discutir indicadores normalizados por AD (EUAD), pois reforça que o enquadramento físico-hídrico (AD/textura) é um componente dominante na variação conjunta dos atributos, especialmente quando se comparam ambientes com diferentes proporções de areia e frações finas (BRASIL, 2022; Qu et al., 2023).

7.3.12 Análise de Componentes Principais para o anos de 2023 (PCAs)

A Figura 21 indica que o PC1 explica 35,0% da variância e sintetiza um gradiente fortemente associado à retenção/armazenamento de água e ao funcionamento biológico acoplado à MOS, em oposição ao caráter arenoso do solo enquanto o PC2 (25,4%) captura variações secundárias ligadas a condições químicas e a alguns componentes do metabolismo microbiano. As maiores cargas positivas no PC1 foram arilsulfatase (0,948), silte (0,913), MO (0,896), CBM (0,866), AD (0,864) e fosfatase (0,855), seguidas por respiração (0,648) e FDA (0,641). Em sentido contrário, as maiores cargas negativas foram areia (−0,831), C/N (−0,693) e, em menor magnitude, quociente metabólico qCO_2 (−0,277) e pH (−0,042). Em termos mecanísticos, isso sustenta que ambientes com maior fração fina (silte/argila) e maior AD (estimada pela textura conforme o modelo normativo do ZARC) tendem a apresentar maior biomassa microbiana (CBM) e maior expressão de enzimas ligadas à ciclagem de nutrientes, especialmente S (arilsulfatase) e P (fosfatase), além de maior atividade global (FDA) e respiração. Essa interpretação é consistente com evidências recentes de que água no solo e textura modulam o habitat microbiano, a difusão de substratos e a estabili-

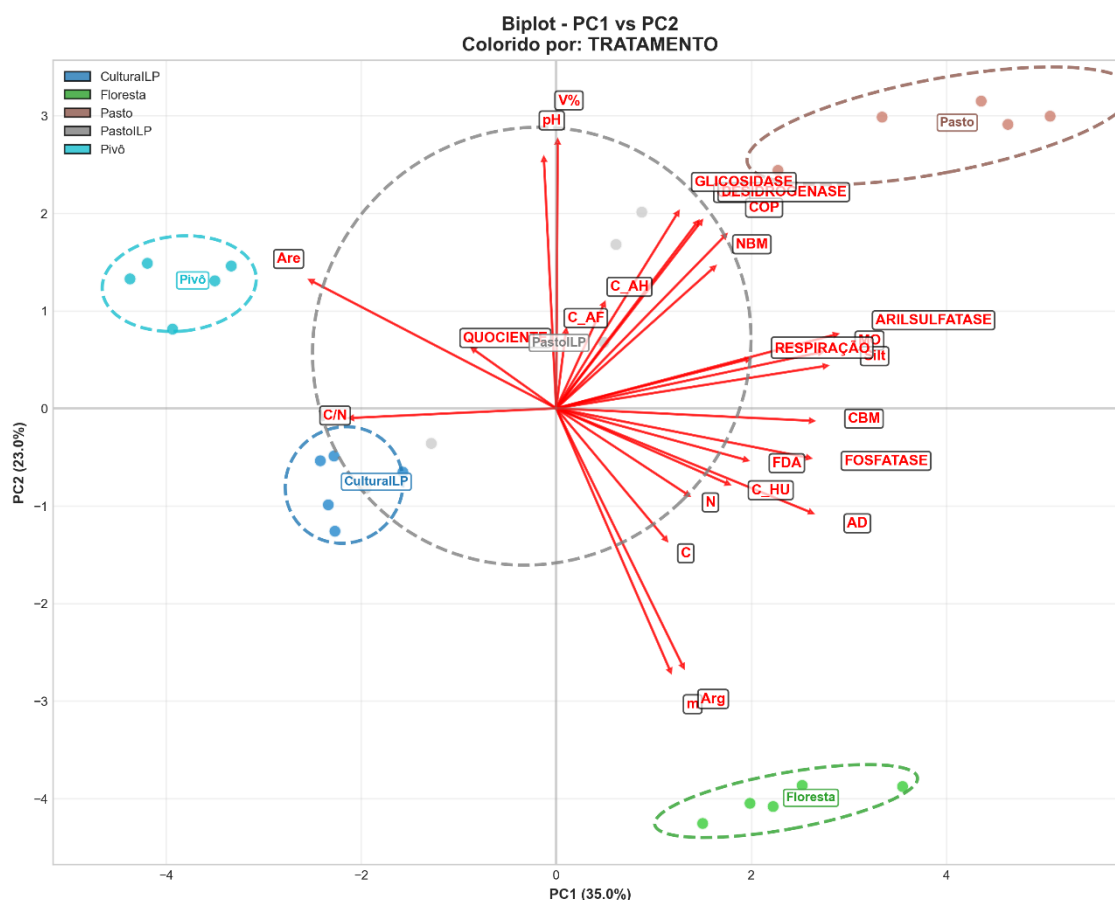
dade/atividade enzimática, particularmente sob condições de estresse hídrico (Qu et al., 2023), e com abordagens atuais de saúde do solo que reconhecem enzimas (p.ex., β -glicosidase e arilsulfatase) como componentes funcionais do score de ciclagem de nutrientes associados à MOS (Arthur et al., 2025).

O biplot (PC1 \times PC2) (Figura 21) evidencia separação multivariada dos tratamentos coerente com esse gradiente. O Pivô (convencional irrigado) agrupa-se no lado negativo do PC1, próximo ao vetor Areia (areia), indicando associação com maior caráter arenoso e, portanto, menor alinhamento com o conjunto AD–MO–CBM–enzimas que carrega positivamente no PC1. A CulturalLP também ocupa o setor com PC1 negativo (mais próximo de C/N), sugerindo que sua variação está relativamente mais associada à relação C/N e à componente arenosa do gradiente do que aos indicadores de AD e enzimas com cargas altas positivas. Já o Pasto está deslocado para o quadrante com PC1 positivo e PC2 positivo, alinhado visualmente com vetores como glicosidase e desidrogenase (no plano PC1–PC2) e com COP, NBM e C_AH/C_AF, sugerindo um ambiente com atividade microbiana e frações mais lábeis/particuladas do C mais relacionadas à dinâmica de resíduos radiculares e deposição orgânica típica de pastagens. Em sistemas integrados (ILP), respostas desse tipo (mudança na biomassa microbiana e enzimas conforme diversidade de plantas e fluxo de resíduos) têm sido relatadas, com variações temporais e sensibilidade a manejo e sazonalidade (Costa et al., 2024; Duarte et al., 2025).

A Floresta nativa aparece bem separada no quadrante com PC1 positivo e PC2 negativo, aproximando-se dos vetores de argila (Arg) e m% (saturação por Al) (direcionados para PC2 mais negativo), além de certa proximidade com C e N. Isso sugere um ambiente com maior influência de frações finas e condições químicas típicas de solos sob vegetação nativa (incluindo maior acidez e Al trocável em muitos contextos tropicais), com repercussões sobre estabilização de MOS e formação de associações organominerais. O fato de AD (0,864 mm cm⁻¹) e CBM (0,866) também carregarem fortemente no PC1 reforça que parte dessa separação pode ser explicada pela capacidade físico-hídrica (textura) e pelo acoplamento com biomassa/atividade microbiana. Já o PastoILP se concentra próximo ao centro do biplot, sugerindo condição intermediária e/ou maior heterogeneidade

interna (sobreposição com o núcleo do espaço amostral), o que é compatível com sistemas de transição/mosaico em que coexistem legados de uso anterior, efeitos de pastejo e entradas de resíduos do componente agrícola (Costa et al., 2024).

Figura 21: Análise de Componentes Principais (PCA) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.

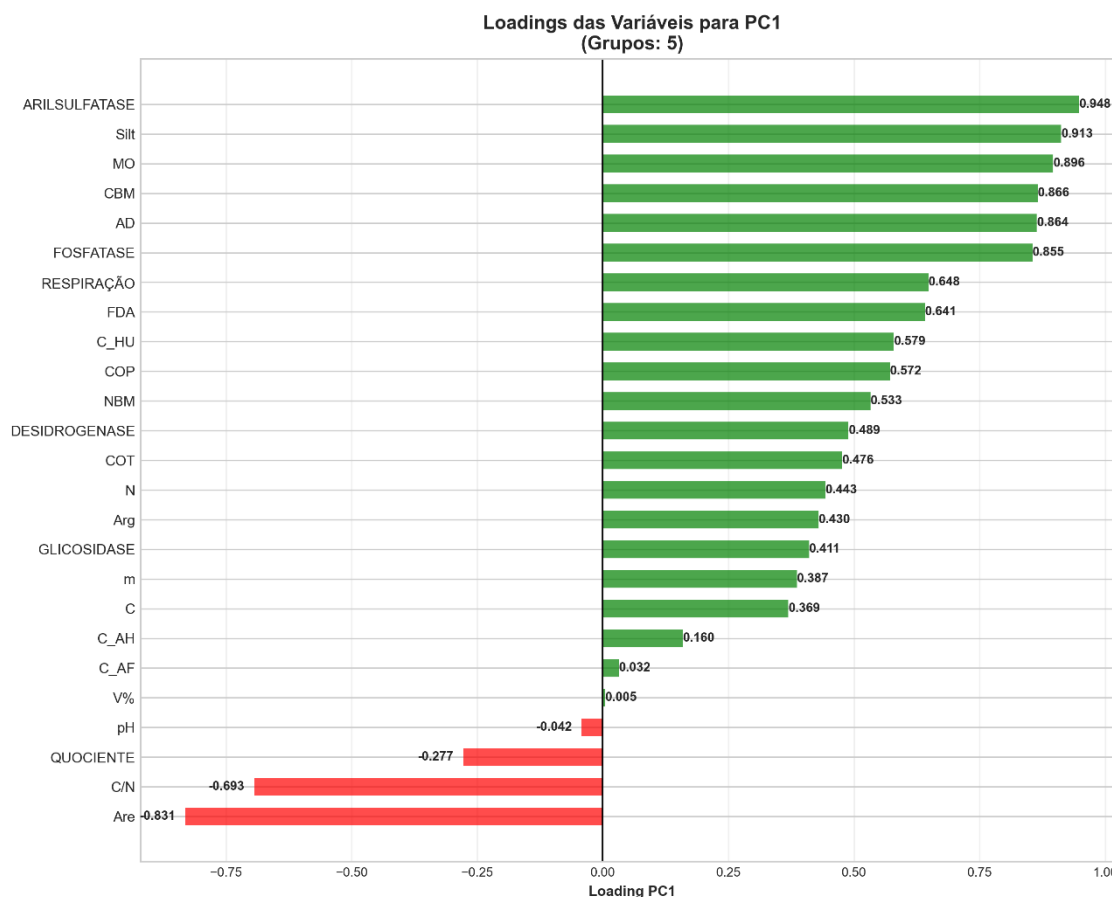


Obs.: PCA apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como co-variáveis: pH - Potencial Hidrogênio Iônico (adimensional); m - Saturação por Alumínio (%); V% - Saturação por Bases (%); MO - Matéria Orgânica (g dm^{-3}); COT - Carbono Orgânico Total (g kg^{-1}); COP - Carbono Orgânico Particulado (g kg^{-1}); C - Carbono da Matéria Orgânica (g kg^{-1}); N - Nitrogênio da Matéria Orgânica (g kg^{-1}); C/N - Relação Carbono/Nitrogênio (adimensional); Arg - Argila (%); Silt - Silte (%); Are - Areia (%); AD - Água Disponível (mm cm^{-1}); CBM - Carbono da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); NBM - Nitrogênio da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); DESIDROGENASE - Atividade da Desidrogenase ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$); RESPIRAÇÃO - Respiração Basal do Solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); ARILSULFATASE - Atividade da Arilsulfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); FDA - Fluoresceína Diacetato ($\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$); GLICOSIDASE - Atividade da β -Glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); FOSFATASE - Atividade da Fosfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); QUOCIENTE - Quociente Metabólico (qCO_2) ($\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{CBM h}^{-1}$); C_AF - Ácido Fúlvico (g kg^{-1}); C_AH - Ácido Húmico (g kg^{-1}); C_HU - Humina (g kg^{-1}).

Os resultados da Figura 22 sustentam inferências robustas sobre o eixo dominante: a forte oposição arilsulfatase (0,948), MO (0,896), CBM (0,866), AD

(0,864), fosfatase (0,855) versus areia ($-0,831$) e C/N ($-0,693$) indica que textura/AD e MOS controlam a estrutura conjunta dos atributos biológicos e químicos no conjunto de dados. Isso é consistente com sínteses recentes que mostram que seca/baixa disponibilidade hídrica reduz biomassa e atividades enzimáticas e reorganiza o metabolismo microbiano, e com estudos em sistemas integrados que relatam ganhos de indicadores biológicos e de ciclagem de nutrientes quando há maior aporte e diversidade de resíduos e melhor cobertura do solo, embora com forte dependência do contexto edafoclimático e do histórico de manejo (Costa et al., 2024; Duarte et al., 2025; Qu et al., 2023).

Figura 22: Gráfico de Barras Divergentes apresentando correlações positivas e negativas dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.



Obs.: Gráfico de Barras Divergentes apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como co-variáveis no ano de 2023. pH - Potencial Hidrogênio Iônico (adimensional); m - Saturação por Alumínio (%); V% - Saturação por Bases (%); MO - Matéria Orgânica (g dm^{-3}); COT - Carbono Orgânico Total (g kg^{-1}); COP - Carbono Orgânico Particulado (g kg^{-1}); C - Carbono da Matéria Orgânica (g kg^{-1}); N - Nitrogênio da Matéria Orgânica (g kg^{-1}); C/N - Relação Carbono/Nitrogênio (adimensional); Arg - Argila (%); Silt - Silte (%); Are - Areia (%); AD - Água Disponível (mm cm^{-1}); CBM - Carbono da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); NBM - Nitrogênio da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); DESIDROGENASE - Atividade da Desidrogenase ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$); RESPIRAÇÃO - Respiração Basal do Solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$); ARILSULFATASE - Atividade da Arilsulfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); FDA - Fluoresceína Diacetato ($\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$); GLICOSIDASE - Atividade da β -Glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); FOSFATASE - Atividade da Fosfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); QUOCIENTE - Quociente Metabólico (qCO_2) ($\text{mg C-CO}_2 \text{g}^{-1} \text{CBM h}^{-1}$); C_AF - Ácido Fúlvico (g kg^{-1}); C_AH - Ácido Húmico (g kg^{-1}); C_HU - Humina (g kg^{-1}).

Os estudos realizados em 2023, a semelhança do ano anterior, mostram

uma estrutura de covariação e agrupamentos no espaço de componentes. Assim, a evidência aqui é de separação multivariada: Pivô associado ao polo arenoso (PC1 negativo), Floresta separada com PC1 positivo e PC2 negativo, Pasto concentrado com PC1/PC2 positivos, e PastoLP mais central (intermediário).

Nesse sentido, os estudos também dialogam diretamente com uma discussão mecanística em que a AD (0,864) — estimada pela textura — e as frações finas (silte 0,913; argila 0,430) organizam simultaneamente a variação de parâmetros relacionados a MOS (MO 0,896; C_HU 0,579, C/N -831) e de indicadores microbiológicos/enzimáticos (arilsulfatase 0,948; fosfatase 0,855; CBM 0,866; respiração 0,648; NBM 0,533) e que, em termos aplicados, dão suporte à sua estratégia de discutir indicadores normalizados por AD (EUAD), pois reforça que o enquadramento físico-hídrico (AD/textura) é um componente dominante na variação conjunta dos atributos, especialmente quando se comparam ambientes com diferentes proporções de areia e frações finas (BRASIL, 2022; Qu et al., 2023).

7.4 Estimativa da Eficiência do Uso de Água Disponível (EUAD)

A EUAD surge como proposta de normalizar a resposta biológica do solo pela capacidade do reservatório hídrico potencial controlado pela textura, especialmente em ambientes arenosos, nos quais a limitação hídrica é estrutural (baixa microporosidade e menor retenção) e tende a intensificar oscilações de umidade e estresse microbiano. Em suma, esse parâmetro não mede a eficiência atual, mas a potencial sugerindo qual seria o comportamento do agroecossistema quando alcança a água disponível (AD) própria de sua textura.

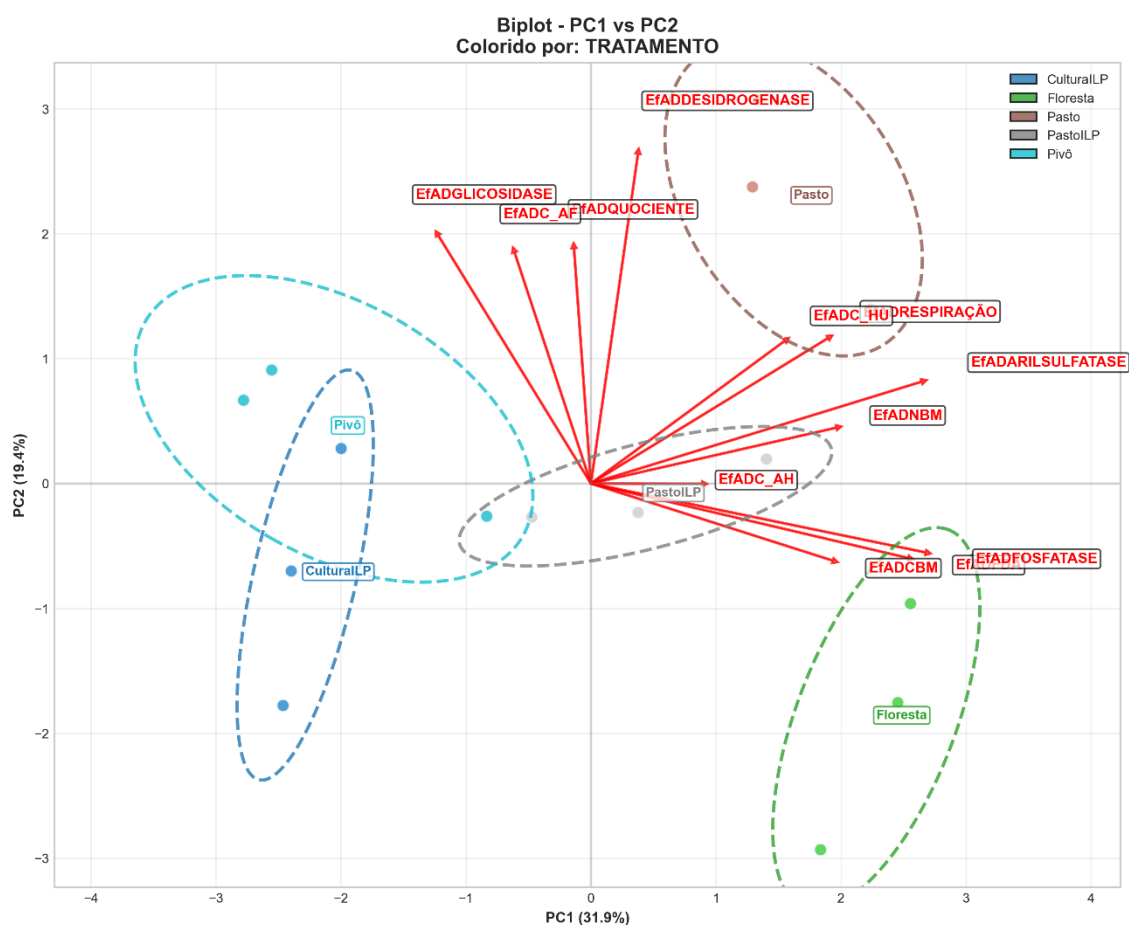
7.4.1 Eficiência do Uso de Água Disponível para o anos de 2022 (EUAD)

A Figura 23 mostra que o PC1 explica 31,9% da variância e o PC2 explica 19,4%. As maiores contribuições positivas para o PC1 são EfADFOSFATASE (0,892), EfADARILSULFATASE (0,881) e EfADFDA (0,845), seguidas por EfADNBM (0,654), EfADCBM (0,644) e EfADRESPIRAÇÃO (0,631); já EfADC_HU (0,516) e EfADC_AH (0,295) contribuem moderadamente, enquanto EfADDESIDROGENASE (0,125) é baixa. No polo negativo aparecem EfADGLICOSIDASE

(-0,407) e EfADC_AF (-0,203), além de EfADQUOCIENTE (-0,045) próximo de zero. Em conjunto, isso indica que o eixo PC1 é fortemente dirigido por eficiências associadas à mineralização/transformação de P e S (fosfatase e arilsulfatase) e à atividade enzimática global (FDA) por AD, ao passo que a eficiência da glicosidase (ligada à decomposição de carboidratos) se comporta de forma oposta no conjunto analisado. Do ponto de vista funcional, essa dissociação entre enzimas é plausível porque diferentes enzimas respondem a controles distintos (qualidade do carbono, demanda por nutrientes, limitações difusivas e micro hidrologia), e a normalização por um componente hidrológico (AD) tende a evidenciar mais claramente produção/atividade por capacidade de armazenamento de água do que valores absolutos (Arthur et al., 2025; Bogati et al., 2025).

No biplot PC1 × PC2, observa-se separação consistente dos tratamentos no espaço das eficiências EUAD. A Floresta nativa se agrupa com PC1 positivo e PC2 negativo, muito próxima aos vetores EfADCBM e EfADFOSFATASE, sugerindo maior eficiência (por AD) de biomassa microbiana e de fosfatase, o que é coerente com ambientes com maior aporte contínuo de resíduos e maior complexidade de micro-habitats que sustentam ciclagem biológica eficiente. O Pasto aparece no quadrante com PC1 e PC2 positivos, alinhando-se mais com EfADRESPIRAÇÃO, EfADC_HU e com o vetor EfADARILSULFATASE; isso sugere que, em pastagem, a eficiência por AD está mais associada a metabolismo microbiano (respiração) e a processos do ciclo do S e estabilização/associação com frações húmicas (humina), compatível com forte contribuição radicular e reciclagem de serapilheira/raízes. A CulturalILP e o Pivô ficam no lado negativo do PC1, no mesmo semiplano para o qual aponta EfADGLICOSIDASE (-0,407), sugerindo que nesses sistemas a variação relativa está mais associada ao conjunto de eficiências que puxam o PC1 para baixo; já o PastoILP permanece mais central, indicando comportamento intermediário/misto e maior sobreposição multivariada, cenário frequente em ILP por heterogeneidade espacial e temporal de entradas de C e distúrbios (Costa et al., 2024; Duarte et al., 2025).

Figura 23: Análise de Componentes Principais (PCA) das estimativas de Eficiências do Uso de Água Disponível (EUAD) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.

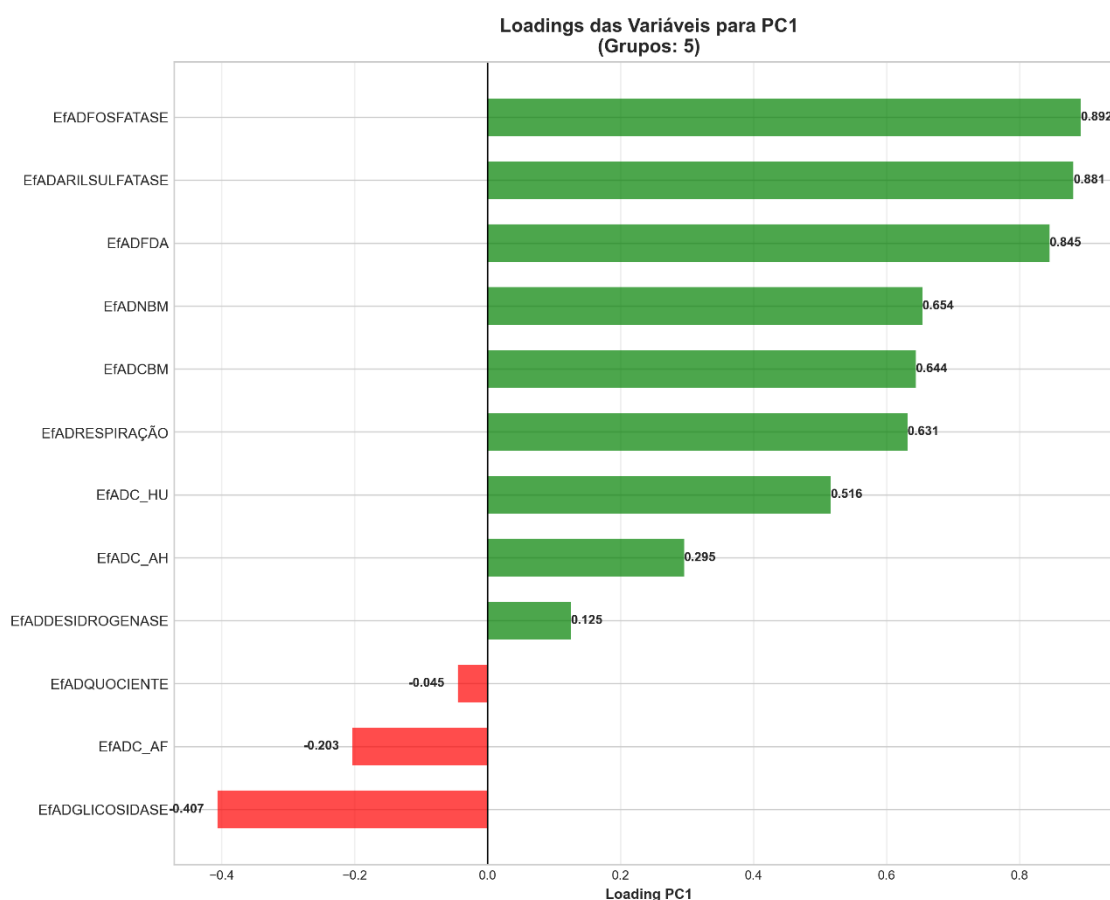


Obs.: PCA apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como co-variáveis. EfaDCBM - Eficiência do Carbono da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); EfaDNBM - Eficiência do Nitrogênio da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); EfaDDESIDROGENASE - Eficiência da Atividade da Desidrogenase ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDRESPIRAÇÃO - Eficiência da Respiração Basal do Solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$); EfaDARILSULFATASE - Eficiência da Atividade da Arilsulfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDFDA - Eficiência da Fluoresceína Diacetato ($\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDGLICOSIDASE - Eficiência da Atividade da β -Glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDFOSFATASE - Eficiência da Atividade da Fosfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDQUOCIENTE - Eficiência do Quociente Metabólico (qCO_2) ($\text{mg C-CO}_2 \text{g}^{-1}$); EfaDCBM - Eficiência do Carbono da Biomassa Microbiana (h^{-1}); C_AF - Eficiência do Ácido Fúlvico (g kg^{-1}); EfaDC_AH - Eficiência do EfaDÁcido Húmico (g kg^{-1}); EfaDC_HU - Eficiência da Humina (g kg^{-1}).

A Figura 24 mostra que ao dividir atividades/estoques por AD, o índice tende a representar uma espécie de função por capacidade hídrica, aproximando

a leitura de eficiência ecossistêmica em condições contrastantes de textura e armazenamento de água. Nesse contexto, o fato de EfADFDA (0,845) e EfADRESPIRAÇÃO (0,631) carregarem positivamente no PC1 sugerem que o eixo dominante capta uma dimensão de atividade biológica total por AD, enquanto EfADFOSFATASE (0,892) e EfADARILSULFATASE (0,881) indicam uma dimensão de ciclagem de nutrientes por AD fortemente estruturante. Trabalhos recentes reforçam que umidade do solo e eventos de seca reorganizam biomassa microbiana e atividades enzimáticas e, portanto, índices que incorporam o componente hídrico podem ser úteis para comparações entre usos/manejos (Bogati et al., 2025; Philipp et al., 2025). Além disso, a associação de fosfatase com carbono orgânico/qualidade do C também é amplamente suportada, o que ajuda a interpretar por que as eficiências dessas enzimas se destacam na ordenação (Li et al., 2025).

Figura 24: Gráficos de Barras Divergentes das estimativas de Eficiências do Uso de Água Disponível (EUAD) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2022.



Obs.: Gráfico de Barras Divergentes apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como co-variáveis no ano de 2022. PCA apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como co-variáveis. EfaDCBM - Eficiência do Carbono da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); EfaDNBM - Eficiência do Nitrogênio da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); EfaDDESIDROGENASE - Eficiência da Atividade da Desidrogenase ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDRESPIRAÇÃO - Eficiência da Respiração Basal do Solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$); EfaDARILSULFATASE - Eficiência da Atividade da Arilsulfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDFDA - Eficiência da Fluoresceína Diacetato ($\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDGLICOSIDASE - Eficiência da Atividade da β -Glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDFOSFATASE - Eficiência da Atividade da Fosfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDQUOCIENTE - Eficiência do Quociente Metabólico (qCO_2) ($\text{mg C-CO}_2 \text{g}^{-1} \text{EfaDCBM h}^{-1}$); C_AF - Eficiência do Ácido Fúlvico (g kg^{-1}); EfaDC_AH - Eficiência do EfaDÁcido Húmico (g kg^{-1}); EfaDC_HU - Eficiência da Humina (g kg^{-1}).

A Análise de Componentes Principais (PCA) oferece uma base sólida

para compreender a estrutura de covariação e o padrão de separação multivariada dos sistemas estudados: (i) A Floresta demonstrou uma clara associação com as eficiências de CBM e fosfatase ($PC1 > 0$, $PC2 < 0$); (ii) O Pasto se correlacionou com a respiração, C_HU e arilsulfatase ($PC1 > 0$, $PC2 > 0$); (iii) Os sistemas Pivô e CulturalLP concentraram-se no semiplano de $PC1 < 0$, especificamente na área da EfADglicosidase; e (iv) O PastoILP apresentou uma posição intermediária (Costa et al., 2024; Philipp et al., 2025).

Ao comparar as Figuras 20 e 24, é evidente uma reorganização significativa nos gráficos de barras divergentes. Muitos parâmetros que se mostravam negativos na Figura 20 inverteram-se para positivos na Figura 24. Mesmo os parâmetros que persistiram com valores negativos (Quociente, H_AF e Glicosidase) tiveram seus efeitos atenuados. Essas transformações indicam um distanciamento entre os valores atuais dos parâmetros avaliados (Figura 20) e a capacidade potencial do solo, conforme revelado pela EUAD (Figura 24). Adicionalmente, a direção predominante dessas mudanças apontou para o sistema Pasto, como pode ser observado na comparação entre as Figuras 19 e 23.

Esses resultados sugerem que a EUAD pode atuar como um indicador promissor de Aptidão de Sistemas Integrados (ASI) ou não integrados, especialmente em solos arenosos. Tal indicador pode auxiliar na identificação do sistema mais adequado, bem como seu grau de complexidade, para cada tipo de solo.

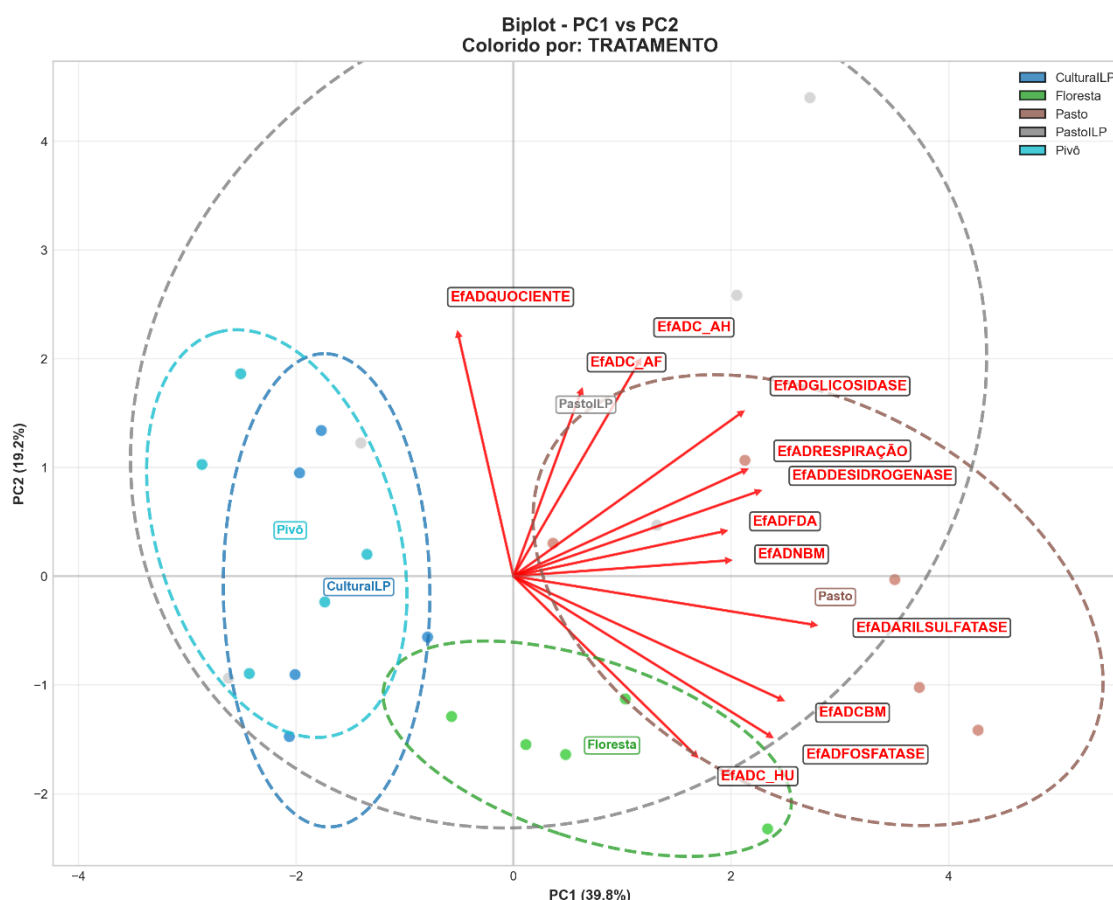
7.4.2 Eficiência do Uso de Água Disponível para o anos de 2023 (EUAD)

A Figura 25 mostra que o PC1 explica 39,8% da variância e o PC2 explica 19,2%, sendo que as maiores contribuições positivas para o PC1 são EfADARILSULFATASE (0,913), EfADCBM (0,813), EfADFOSFATASE (0,780), EfADDESIDROGENASE (0,743) e EfADRESPIRAÇÃO (0,702), seguidas por EfADGLICOSIDASE (0,692), EfADNBM (0,651) e EfADFDA (0,638); já EfADC_HU (0,552) e EfADC_AH (0,382) contribuem moderadamente, enquanto EfADC_AF (0,205) é baixa. No polo negativo aparece apenas EfADQUOCIENTE (-0,168). Isso indica que o eixo PC1 é fortemente dirigido por eficiências associadas à ciclagem de S e P (arilsulfatase e fosfatase), à biomassa microbiana (CBM) e ao metabolismo microbiano (desidrogenase e respiração) por AD, ao passo que o

qCO₂ (eficiência metabólica) tende a variar em sentido oposto, consistente com a interpretação de qCO₂ mais alto como maior custo respiratório por unidade de biomassa/eficiência reduzida (Arthur et al., 2025; Bogati et al., 2025).

No biplot PC1 × PC2, observa-se separação consistente dos tratamentos no espaço das eficiências EUAD. O Pivô e a CulturalLP concentram-se no lado negativo do PC1, indicando menor associação com o conjunto de variáveis que mais carregam positivamente no PC1 (p.ex., EfADARILSULFATASE, EfADCBM, EfADFOSFATASE, EfADDESIDROGENASE e EfADRESPIRAÇÃO). Em contraste, Pasto se desloca para o lado positivo do PC1, aproximando-se dos vetores de EfADARILSULFATASE e, em menor grau, do feixe de vetores de atividade biológica (respiração, desidrogenase, FDA, NBM), sugerindo maior eficiência por AD desses processos no ambiente de pastagem. A Floresta nativa aparece também com PC1 positivo, porém com PC2 mais negativo, mais próxima dos vetores EfADFOSFATASE, EfADCBM e EfADC_HU, sugerindo eficiência por AD associada tanto à biomassa quanto a enzimas e frações mais estáveis da MOS, coerente com sistemas menos perturbados e com maior complexidade de entradas orgânicas. Já o PastoILP permanece mais central/intermediário no gráfico, indicando sobreposição parcial e comportamento transicional típico de sistemas integrados, onde a variabilidade espacial/temporal de resíduos e distúrbios pode diluir a separação em eixos principais (Costa et al., 2024; Duarte et al., 2025).

Figura 25: Análise de Componentes Principais (PCA) das estimativas de Eficiências do Uso de Água Disponível (EUAD) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 2023.

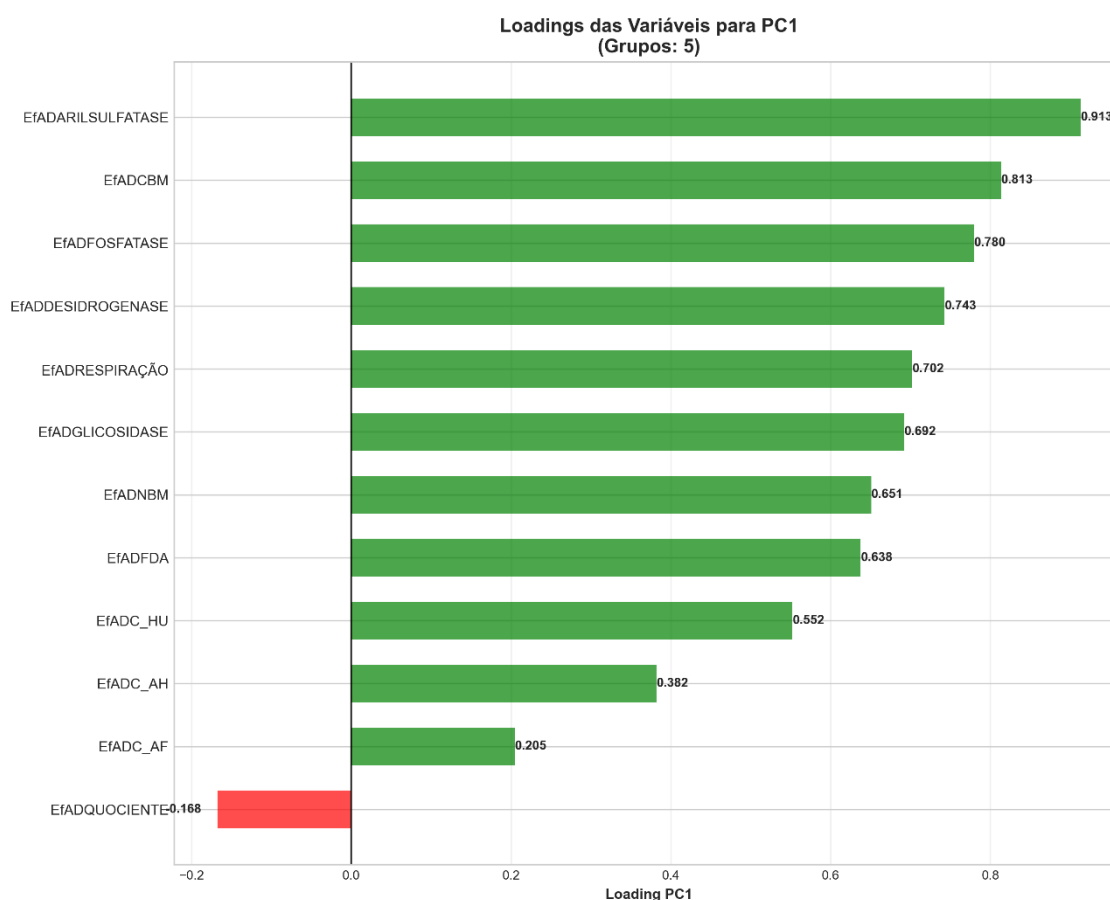


Obs.: PCA apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como co-variáveis. Obs.: PCA apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como co-variáveis. EfaDCBM - Eficiência do Carbono da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); EfaDNBM - Eficiência do Nitrogênio da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); EfaDDESIDROGENASE - Eficiência da Atividade da Desidrogenase ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDRESPIRAÇÃO - Eficiência da Respiração Basal do Solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$); EfaDARILSULFATASE - Eficiência da Atividade da Arilsulfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDFDA - Eficiência da Fluoresceína Diacetato ($\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDGLICOSIDASE - Eficiência da Atividade da β -Glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDFOSFATASE - Eficiência da Atividade da Fosfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDQUOCIENTE - Eficiência do Quociente Metabólico (qCO_2) ($\text{mg C-CO}_2 \text{g}^{-1}$); EfaDCBM - Eficiência do Carbono da Biomassa Microbiana (h^{-1}); C_AF - Eficiência do Ácido Fúlvico (g kg^{-1}); EfaDC_AH - Eficiência do EfaDÁcido Húmico (g kg^{-1}); EfaDC_HU - Eficiência da Humina (g kg^{-1}).

A Figura 26 mostra que ao dividir atividades/estoques por AD, o índice

tende a representar uma espécie de função por capacidade hídrica, aproximando a leitura de eficiência ecossistêmica em condições contrastantes de textura e armazenamento de água. Nesse contexto, o fato de EfADRESPIRAÇÃO (0,702) e EfADDESIDROGENASE (0,743) apresentarem cargas elevadas no PC1 sugere que o eixo dominante capta uma dimensão de atividade e metabolismo microbiano por AD, enquanto EfADFOSFATASE (0,780) e EfADARILSULFATASE (0,913) captam uma dimensão de ciclagem biogeoquímica de P e S por AD. Estudos recentes reforçam que a umidade do solo e o estresse hídrico reorganizam biomassa e atividades enzimáticas e que indicadores sensíveis à água tendem a responder fortemente a eventos de seca, justificando a utilidade de índices que incorporem o componente hídrico para comparações entre usos/manejos (Bogati et al., 2025; Philipp et al., 2025). Além disso, há evidências contemporâneas de que a atividade de fosfatases se associa à qualidade/estoques de C orgânico e à estrutura do habitat microbiano, apoiando sua alta relevância na ordenação por eficiência (Li et al., 2025).

Figura 26: Gráficos de Barras Divergentes das estimativas de Eficiências do Uso de Água Disponível (EUAD) dos parâmetros analisados. Fazenda Ybyeté Porã, Rancharia-SP para o ano de 20223.



Obs.: Este gráfico de Barras Divergentes apresenta os parâmetros analisados estatisticamente e também outros que não passaram por análise estatísticas, mas que, podem atuar como co-variáveis no ano de 2023. PCA apresentando os parâmetros analisados estatisticamente e outros que não passaram por análise estatísticas, mas que podem atuar como co-variáveis. EfaDCBM - Eficiência do Carbono da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); EfaDNBM - Eficiência do Nitrogênio da Biomassa Microbiana (mg kg^{-1}); EfaDDESIDROGENASE - Eficiência da Atividade da Desidrogenase ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDRESPIRAÇÃO - Eficiência da Respiração Basal do Solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$); EfaDARILSULFATASE - Eficiência da Atividade da Arilsulfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDFDA - Eficiência da Fluoresceína Diacetato ($\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDGLICOSIDASE - Eficiência da Atividade da β -Glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDFOSFATASE - Eficiência da Atividade da Fosfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); EfaDQUOCIENTE - Eficiência do Quociente Metabólico (qCO_2) ($\text{mg C-CO}_2 \text{g}^{-1} \text{EfaDCBM h}^{-1}$); C_AF - Eficiência do Ácido Fúlvico (g kg^{-1}); EfaDC_AH - Eficiência do EfaDÁcido Húmico (g kg^{-1}); EfaDC_HU - Eficiência da Humina (g kg^{-1}).

Os achados da PCA confirmam com segurança a estrutura de covaria-

ção e o padrão de separação multivariada: (i) Pivô e CulturalLP situam-se no semiplano de $PC1 < 0$; (ii) O Pasto alinha-se ao semiplano de $PC1 > 0$, estando associado à EfADARILSULFATASE e ao conjunto de atividades microbianas; (iii) A Floresta caracteriza-se por $PC1 > 0$ com $PC2 < 0$, ligada à EfADFOSFATASE, EfADCBM e EfADC_HU; e (iv) O PastoILP ocupa uma posição de transição com maior sobreposição (Costa et al., 2024; Philipp et al., 2025).

Uma análise das Figuras 22 e 26 revela uma notável reconfiguração nos gráficos de barras divergentes. Parâmetros que eram negativos na Figura 22 tornaram-se positivos na Figura 26, e o Quociente, que se manteve negativo, teve seus efeitos consideravelmente reduzidos. Essas alterações apontam para uma distinção crescente entre os parâmetros atualmente avaliados (Figura 22) e a capacidade edáfica potencial, conforme demonstrado pela EUAD (Figura 26). A influência dessas modificações direcionou-se majoritariamente para o sistema Pasto, como se verifica na comparação entre as Figuras 21 e 25.

Em resumo, esses resultados indicam que a EUAD pode servir como um indicador valioso de Aptidão de Sistemas Integrados (ASI) ou não integrados, particularmente para solos de textura arenosa. Isso possibilita a determinação do sistema mais apropriado e seu nível de complexidade para diferentes tipos de solo.

8 CONCLUSÕES

- Em 2022, o ácido fúlvico (AF), fração lábil, foi o mais sensível, variando de 0,87 a 4,30 g kg⁻¹, com maiores teores em Pasto (4,30) e PivôILP (3,89). Já o ácido húmico (AH), fração mais estável, foi maior em sistemas com menos revolvimento do solo (Pasto ~1,75; Floresta 1,15 g kg⁻¹) e menor no PastoILP (0,55 g kg⁻¹).
- A humina (HU), fração mais recalcitrante e indicadora de sequestro de C a longo prazo, evidenciou melhor desempenho dos sistemas perenes. Em 2022, o Pasto teve o maior teor em 0–10 cm (8,04 g kg⁻¹) e manteve estabilidade vertical em 2023 (5,69 g kg⁻¹ na superfície e 5,62 g kg⁻¹ em profundidade). Já o sistema CulturalILP apresentou menor estabilização, com queda para 2,73 g kg⁻¹ em 10–20 cm, sugerindo efeito do revolvimento do solo.
- Em 2022, a respiração do solo foi máxima no Pasto (0,12 mg CO₂ h⁻¹) e mínima no Cultura-ILP (0,026 mg CO₂ h⁻¹). Em 2023, o CBM foi maior em Pasto (181,76 mg C g⁻¹ solo) seguida de Floresta (172,93 mg C g⁻¹). Os menores valores ocorreram em PivôILP (87,47 mg C g⁻¹) e CulturalILP (84,56 mg C g⁻¹).
- Em 2022, a atividade da arilsulfatase foi consistentemente superior no Pasto, atingindo 230,8 µg PNP g⁻¹ solo h⁻¹, enquanto o Pivô apresentou a menor atividade, com aproximadamente 43 µg PNP g⁻¹ solo h⁻¹.
- Houve uma correlação positiva e direta entre os sistemas de manejo que menos movimentam o solo, os teores de carbono nas frações humificadas e a atividade biológica.
- O sistema de Pasto emergiu como o mais eficiente na promoção da qualidade do solo, combinando altos teores de carbono estável com uma elevada e robusta atividade biológica. Os sistemas de PastoILP e CulturalILP mostraram-se como uma alternativa intermediária e promissora.
- A pesquisa pode, no futuro, contribuir como parâmetro norteador sobre a

eficácia dos indicadores selecionados na promoção de sustentabilidade de ecossistemas em solos arenosos do oeste paulista.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abshiba, K., Sharma, V. K., Kumar, P., Syam, S., Barnwal, P. P., and Kumar, S. (2025). A comprehensive review of soil quality indicators under diverse land uses in rainfed areas. *Discover Soil*, 2:91.

Adetunji, A. T., Lewczuk, B., Chudek, M., et al. (2021). Soil dehydrogenase activity as an indicator of soil quality: a review. *Soil Science Annual*, 72(2):145–159.

Alcântara, L. C., Rosset, J. S., Pereira, M. G., and Schiavo, J. (2024). Effect of soil management on carbon stock and humic substances in a red latosol. *Revista Ambiente & Água*, 19:e2953.

Alef, K. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, London.

Almeida, L. T., Rocha, G. F., Silva, M. R. D., Pereira, A. C., Oliveira, S. A., and Martins, R. P. (2023). Efeitos de diferentes sistemas de manejo na atividade enzimática do solo em regiões de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47(2):e0220138.

Alvarenga, P., Palma, P., Mourinha, C., Cunha-Queda, C., Sengo, J., Morais, M.-C., da Luz, T. N., Renaud, M., and Sousa, J. P. (2023). Effects of biowaste-based amendments on soil's humic substances and biochemical properties. *Revista de Ciências Agrárias*, 46(Especial):201–210.

Anderson, T. H. et al. (1993). The metabolic quotient for co₂ (qco₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as ph, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25.

Angst, G., Mueller, K. E., Nierop, K. G. J., and Simpson, M. J. (2021). Plant- or microbial-derived? a review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 156:108189.

Aparecido, L. E. d. O., Moraes, J. R. d. S. C. d., Meneses, K. C. d., Torsoni, G. B., et al. (2020). Köppen-geiger and camargo climate classifications for brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 142:711–728.

Araújo, F. (2022). Bioindicadores de qualidade do solo em agroecossistemas do oeste paulista. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 48(2):156–164.

Araújo, F. et al. (2021). Biomassa microbiana e carbono orgânico do solo sob diferentes manejos e sucessão de culturas. In *SIQUEIRA, M. G. et al. (org.)*, pages 126–138. Editora Científica.

Araújo, F. C. (2023). Atividade enzimática de solos sob diferentes sistemas de manejo no oeste paulista. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47:e0230001.

Arthur, E., Gustave, W., Obalum, S. E., et al. (2025). Organic matter: a critical soil health indicator in agrosystems within the cerrado of bahia, brazil and south florida, usa. *Frontiers in Soil Science*, 5:art. 1524550.

Assad, E. D., Torres Junior, R. A. A., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., Jantalia, C. P., Boddey, R. M., Marchão, R. L., and Batistella, M. (2021). Pastureland intensification and diversification in brazil mediate soil bacterial community structure changes and soil c accumulation. *Applied Soil Ecology*, 160:103858.

Assmann, A. L., Soares, A. B., Franzluebbbers, A. J., et al. (2023). Brachiaria-based integrated systems improve soil quality. *Agriculture*, 13:1199.

Aswin, V., Krishnan, R., Menon, A., et al. (2024). Lignin transformation pathways and stabilization mechanisms in tropical soils. *Geoderma*, 449:116231.

Azevedo, S. A. et al. (2021). Avaliação da qualidade nutricional da alface cultivada em solo sob aplicação de ácidos húmicos e fúlvicos associados à adubação mineral. *Acta Agronômica*, 70(1):1–8.

Backes, C., Ribon, A. A., and Silva, L. L. (2023). Carbono e matéria orgânica do solo em sistema de manejo de produção de pastagem: uma revisão sistemática com meta-análise. *Revista Agrarian*, 16(56):e17176.

Balbino, L. C., Cordeiro, L. A. M., da Silva, V. P., et al. (2021). Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária no brasil. *Research, Society and Development*, 10(2):e8810212177.

Banco Central do Brasil (2023). Comunicado: Novo sistema de classificação de solos adotada no zoneamento agrícola de risco climático – zarc (zarc soja 2023/24).

Bansal, S., Chakraborty, P., and Kumar, S. (2022). Crop-livestock integration enhanced soil aggregate-associated carbon and nitrogen, and phospholipid fatty acid. *Scientific*

Reports, 12:2781.

Barbosa, F. L. A. (2020). Fracionamento químico da matéria orgânica do solo em áreas sob diferentes usos no cerrado. Master's thesis, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Barbosa, J. Z., Poggere, G., Corrêa, R. S., Hungria, M., and Mendes, I. C. (2023). Soil enzymatic activity in brazilian biomes under native vegetation and contrasting cropping and management. *Applied Soil Ecology*, 190:105014.

Barbosa, R. M. (2022). Caracterização climática do oeste paulista: análise de séries históricas 1992-2022. *Boletim de Pesquisa Agropecuária da Embrapa Agropecuária Oeste*, (128):1–45.

Barrett, C. B., Rosegrant, M. W., Godfray, H. C. J., et al. (2022). Socio-technical innovation bundles for agri-food systems transformation. *Nature Food*, 3:974–976.

Barth, G., de Faccio Carvalho, P. C., and Costa, S. E. V. G. (2024). Urochloa in crop-livestock systems under tropical soils. *Agronomy Journal*, 116(1):87–101.

Bastida, F., Eldridge, D. J., García, C., et al. (2021). Soil microbial indicators of ecosystem health. *Environmental Research*, 195:110832.

Beillouin, D., Ben-Ari, T., and Makowski, D. (2021). Evidence map of crop diversification strategies at the global scale. *Environmental Research Letters*, 16(12):123001.

Benites, V. M., Madari, B., and Machado, P. L. O. A. (2003). Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. *Comunicado Técnico - Embrapa Solos*, 16:1–7.

Bhaduri, D. et al. (2022). A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 13.

Bogati, K. A., Sewerniak, P., and Walczak, M. (2025). Unraveling the effect of soil moisture on microbial diversity and enzymatic activity in agricultural soils. *Microorganisms*, 13(6):art. 1245.

Bonanomi, G., Incerti, G., Barile, E., et al. (2021). Lignin controls decomposition rates of plant litter and influences soil carbon stabilization. *Plant and Soil*, 466:17–31.

BRASIL (2022). Instrução normativa spa/mapa nº 1, de 21 de junho de 2022. Diário

Oficial da União: Brasília, DF, 22 jun. 2022.

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., et al. (2020). Soil quality – a critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120:107961.

Cagna, C. P., Biru, M. K., Leitaó, D. A. H. S., Barreto-Garcia, P. A. B., Viriato, V., Dubeux Jr., J. C. B., Tormena, C. A., and Nunes, M. R. (2026). Synergistic agricultural systems improve soil health and support sustainable land use in sandy soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 400:110193.

Carneiro, V. P. et al. (2022). *Aplicação de ácidos húmicos e fúlvicos em lavoura cafeeira no município de Monte Carmelo*. PhD thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Carvalho, A. M. d., Ramos, M. L. G., Santos, D. C. R. d., Oliveira, A. D. d., Mendes, I. d. C., Silva, S. B., Sousa, T. R. d., Dantas, R. d. A., Silva, A. M. M., and Marchão, R. L. (2024). Understanding the relations between soil biochemical properties and n₂O emissions in a long-term integrated crop–livestock system. *Plants*, 13(3):365.

Castellano, M. J., Mueller, K. E., Olk, D. C., et al. (2021). Integrating plant litter quality and soil organic matter stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 159:108291.

Ceccon, G., Staut, L. A., Richetti, A., et al. (2023). Cover crops and straw persistence under no-tillage in the cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 58:e03118.

Chen, L., Wang, Y., Zhang, H., and Liu, S. (2023a). Temporal dynamics of soil enzyme activities under different land use systems in integrated crop-livestock systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 177:108–119.

Chen, L., Wang, Y., Zhao, X., and Li, Q. (2023b). Soil nitrogen mineralization under contrasting land management systems. *Applied Soil Ecology*, 188:104856.

Chen, R., Senbayram, M., Blagodatsky, S., Myachina, O., Dittert, K., and Kuzyakov, Y. (2021a). Organic-c quality as a key driver of microbial nitrogen immobilization in soil: a meta-analysis. *Geoderma*, 383:114784.

Chen, X. et al. (2021b). Residue stoichiometry regulates decomposition dynamics in agricultural systems. *Geoderma*, 404:115280.

Chen, X., Huang, W., and Peng, T. (2022). Hemicellulose composition and decomposition

behavior in agricultural residues. *Geoderma*, 417:115808.

Chen, X., Zhang, Y., Liu, M., Wang, P., Li, R., and Sun, H. (2024). Stable soil carbon sequestration in agricultural systems mediated by humified organic fractions and mineral association. *Geoderma*, 449:116987.

Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Cerri, C. E. P., Oliveira, D. D. C., Davies, C. A., and Cerri, C. C. (2020). Soil microbial biomass and enzyme activity in brazilian oxisols under land-use change. *Bragantia*, 79(4):530–542.

Cordeiro, L. A. M., Kluthcouski, J., and Oliveira, P. d. (2020). Integração lavoura-pecuária em solos arenosos: estudo de caso da fazenda campina no oeste paulista. Technical Report 357, Embrapa Cerrados, Planaltina.

Corrales, R. C., Martins, B. S., Silva, F. R., et al. (2023). Structural components of crop residues and their persistence in tropical agricultural soils. *Soil Systems*, 7(4):96.

Costa, R. M., Araújo, E. M. B., Silva, D. E. O., Rocha, S. M. B., Bonifacio, A., Sousa, R. S., Pereira, A. P. A., Medeiros, E. V., Sagrilo, E., Oliveira Junior, J. O. L., Souza, H. A., and Araujo, A. S. F. (2024). Seasonal responses of soil microbial biomass c and enzymatic activity comparing no-tillage and integrated crop-livestock systems. *European Journal of Soil Biology*, 121:103628.

Cotrufo, M. F., Lehmann, J., et al. (2022a). Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3(3):179–189.

Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., et al. (2022b). Soil organic matter is an ecosystem property shaped by microbial processes. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3:592–609.

Coutinho, F. S., Pinto, L. A. d. S. R., Pereira, M. G., Assunção, S. A., Zandoná, S. R., Barros, F. d. C., Souza, R. S. d., Fagundes, H. d. S., and Souza, E. H. S. e. (2020). Soil quality indicators in areas with different vegetation cover in the atlantic forest biome, southeastern brazil. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 11(7):1–15.

da Silva, M. P., Oliveira, C. E., Santos, J. F., and Ferreira, L. M. (2024a). Physical indicators of soil quality under integrated agricultural systems in tropical regions. *Soil and Tillage Research*, 245:106118.

da Silva, R. F., Souza, M. A., and Almeida, C. R. (2024b). Fulvic fractions and soil quality under tropical management systems. *Geoderma*, 448:116821.

da Silva, R. F., Souza, M. A., Pereira, J. V., Almeida, C. R., and Moraes, T. P. (2024c). Humic fractions and nutrient retention under tropical integrated agricultural systems. *Soil Use and Management*, 40(1):e12984.

da Silva, R. M., Souza, F. A., Costa, L. P., Mendes, I. C., and Assmann, A. L. (2024d). Microbial biomass and enzymatic activity as indicators of soil quality in integrated crop-livestock systems. *Applied Soil Ecology*, 197:105386.

Damiana, J. M., Matos, E. S., Pedreira, B. C., Carvalho, P. C. F., Premazzi, L. M., Williams, S., Paustian, K., and Cerri, C. E. P. (2021). Predicting soil c changes after pasture intensification and diversification in brazil. *Catena*, 202:105238.

de Bortolli, M. A., Assmann, T. S., de Bortolli, B. B., Maccari, M., Bernardon, A., Jamhour, J., Franzluebbers, A. J., Soares, A. B., and Severo, I. K. (2024). Nutrient dynamics in integrated crop-livestock systems: effects of stocking rates and nitrogen system fertilization on litter decomposition and release. *Agronomy*, 14(9):2009.

de Faccio Carvalho, P. C., Anghinoni, I., de Moraes, A., et al. (2022). Integrated crop-livestock systems in brazil: a review of opportunities and challenges for sustainable intensification. *Agricultural Systems*, 203:103527.

de Faccio Carvalho, P. C., Peterson, C. A., de Almeida Nunes, P. A., et al. (2021). Animal production and soil ecosystem services in integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. *Journal of Animal Science*, 99(6):1–15.

De Lima, R. P., Rolim, M. M., Toledo, M. P. S., Tormena, C. A., Da Silva, A. R., E Silva, I. A. C., and Pedrosa, E. M. R. (2022). Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 215:105215.

de Miranda, E. E., Magalhães, L. A., and Carvalho, C. A. (2022). Sustainability pathways for brazilian agriculture under climate change. *Sustainability*, 14(21):14382.

de Oliveira, M. H., Souza, R. A., Ferreira, L. H., et al. (2023). Crop residue quality affects nutrient cycling and sustainability in tropical no-tillage systems. *Agronomy Journal*, 115(4):1842–1855.

Deng, L. et al. (2019). Soil beta-glucosidase activity as an indicator of soil health and organic matter transformation: A meta-analysis. *Soil Biology & Biochemistry*, 130:105–113.

Doran, J. W. et al. (2021). Soil health and sustainability: managing biological indicators. *Applied Soil Ecology*, 165:103985.

Duarte, A. C. S., Oliveira, J. C. C., Oliveira, W. R., et al. (2025). Restoring soil health with legume-based integrated farming systems. *Sustainability*, 17(8):3340.

Duru, M., Therond, O., Martin, G., et al. (2022). How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4):1–20.

Elias, D. M. O., Mason, K. E., Goodall, T., Taylor, A., Zhao, P., Otero-Fariña, A., Chen, H., Peacock, C. L., et al. (2024). Microbial and mineral interactions decouple litter quality from soil organic matter formation. *Nature Communications*, 15:10058.

Embrapa (2018). *Indicadores de qualidade do solo e da água*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília.

Embrapa (2020). Bioas – tecnologia de bioanálise do solo.

Embrapa (2023). Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo: manual técnico.

Embrapa (2025). Atividade enzimática do solo e sustentabilidade agrícola: síntese de pesquisas e recomendações.

Embrapa Meio Ambiente (2022a). Qualidade biológica de solos: protocolos de avaliação para diferentes biomas.

Embrapa Meio Ambiente (2022b). Qualidade biológica de solos: protocolos de avaliação para diferentes biomas.

Espantoso, A. T. et al. (2023). Long-term effects of organic amendments on soil enzyme activities and microbial communities under tropical conditions. *Applied Soil Ecology*, 187.

FAO (2022a). Global soil organic carbon: status, vulnerability and management.

FAO (2022b). *Global Soil Organic Carbon: status, vulnerability and management*. Food

and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Farias, P. G. S., Souza, C. B. S., Schiavo, J., Rosset, J. S., Ozório, J. M. B., Oliveira, N. S., Couto, A. M., Tomazi, M., and Salton, J. C. (2025). Chemical attributes and fractionation of soil organic matter in integrated and conventional agricultural production systems in the midwest, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 157:105444.

Fernández-Calviño, D. et al. (2022). Linking soil beta-glucosidase activity to microbial community structure and soil organic carbon fractions under different land uses. *Science of The Total Environment*, 832.

Ferraz, V. et al. (2021). Sistemas de integração lavoura pecuária na América do Sul: perspectivas e implicações para a sustentabilidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 45:e023002.

Ferreira, A. A., Rodrigues, D. F., Dos Santos, L., Chagas, R. A., Lopes, C. B., and Vanin, D. C. (2023). Atividade enzimática da amilase e fosfatase ácida no sistema solo-planta: revisão. *Research, Society and Development*, 12(2).

Ferreira, A. S., Camargo, F. A. O., and Vidor, C. (1999). Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23(4).

Ferreira, D. F. (2019). Sisvar: um sistema de análise de variância para dados balanceados.

Ferreira, G. C. et al. (2022). Frações da matéria orgânica do solo em sistemas de plantio direto e integração lavoura pecuária no cerrado goiano. *Revista de Iniciação Científica da Universidade de Rio Verde*, 1(1):1–10.

Ferreira, L. et al. (2021). Lignin concentration regulates persistence of crop residues under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 208:104879.

Fontenelle, A. (2024). Resultados e discussão em artigo científico - como fazer um tcc.

Franzluebbers, A. J., Chiavegato, M. B., and de Faccio Carvalho, P. C. (2022). Integrated crop-livestock systems: key management to enhance soil ecosystem services. *Soil Systems*, 6(2):38.

Frighetto, R. T. S. (2000). Análise da biomassa microbiana em carbono: método de fumigação-extração. In *Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo*. Embrapa, Jaguariúna.

Gamage, J. et al. (2024). Chemical composition of soil humin in an organic soil profile. *Geoderma*, 446:115897.

Gazolla, P. R., Guareschi, R. F., Perin, A., Pereira, M. G., and Rossi, C. Q. (2015). Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. *Semina: Ciências Agrárias*, 36(2):693–704.

Geisseler, D., Linquist, B. A., and Lundy, M. E. (2022). A global meta-analysis of soil microbial biomass and respiration in response to agricultural management. *Soil Biology and Biochemistry*, 174:108822.

Gil, J. D. B., Siebold, M., Bernardi, A. C. C., Moraes, A. d., Spera, S. T., Ferreira, J. N., Floriani, N., Lisboa, I. P., and Mielniczuk, J. (2021). Integrated crop-livestock systems: A sustainable land-use alternative for food production in the Brazilian Cerrado and Amazon. *Journal of Cleaner Production*, 283:124580.

Hall, S. J., Huang, W., Yu, W., et al. (2023). Contrasting geochemical and fungal controls on decomposition of lignin and soil carbon at continental scale. *Nature Communications*, 14:2227.

Herrero, M., Thornton, P. K., Mason-D'Croz, D., et al. (2021). Articulating the effect of food systems innovation on the sustainable development goals. *The Lancet Planetary Health*, 5(1):e50–e62.

Huang, L., He, M., Huang, Y., Chang, T., Xu, G., Guan, C., Fu, J., and Cheng, J. (2025). Fulvic acid-amino acid organic fertilizer: Optimal co-application, sustainable remediation, and yield improvement strategies for saline-alkaline cotton fields in Xinjiang. *Industrial Crops and Products*, 228:120553.

Huang, W., Yu, W., Yi, B., Raman, E., Yang, J., Hammel, K. E., Timokhin, V. I., Lu, C., Howe, A., Weintraub-Leff, S. R., and Hall, S. J. (2023). Contrasting geochemical and fungal controls on decomposition of lignin and soil carbon at continental scale. *Nature Communications*, 14:2227.

Ihumico (2025). Benefícios do ácido húmico para plantas: um guia para impulsionar o desenvolvimento e a produtividade.

Jiang, L., Zhang, W., Li, J., et al. (2022). Temperature sensitivity and moisture modulation of soil respiration across biomes: a global synthesis. *Soil Biology and Biochemistry*,

164:108493.

Joergensen, R. G. et al. (1990). Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 m K₂SO₄ soil extracts. *Soil Biology and Biochemistry*, 22:1031–1038.

Joergensen, R. G., Hemkemeyer, M., Beule, L., Iskakova, J., Oskonbaeva, Z., and Rummel, P. S. (2024). A hitchhiker's guide: estimates of microbial biomass and microbial gene abundance in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 60:457–470.

Juliano, P. H. G. et al. (2023). Qualidade do solo em sistema agropastoril com aplicação de agromineral silicático. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 58:e03012.

Kappes, C. et al. (2020). Integrating crop livestock systems for sustainable intensification in south america. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295:106892.

Karlen, D. L., Rice, C. W., Hurley, E. G., et al. (2021). Soil health: current status and future opportunities. *Agronomy Journal*, 113:1837–1851.

Kaschuk, G., Alberton, O., and Hungria, M. (2020). Establishing reference values for soil microbial biomass-c in agroecosystems in the atlantic forest biome in southern brazil. *Ecological Indicators*, 117:106586.

Kumar, S. et al. (2021). Beta-glucosidase activity as a functional bioindicator of soil health in agroecosystems: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 325.

Lal, R. (2021a). Sequestering carbon and increasing productivity in degraded lands. *Environment, Development and Sustainability*, 23(2):561–577.

Lal, R. (2021b). Soil organic matter and global food security. *Journal of Soil and Water Conservation*, 76(5):130A–137A.

Lavallee, J. M., Soong, J. L., and Cotrufo, M. F. (2020). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms. *Global Change Biology*, 26(1):261–273.

Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., and Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1:544–553.

Lehmann, J., Hansen, D., Schmidt, M. W. I., et al. (2023). Persistence of soil organic matter explained by ecosystem interactions. *Nature*, 615:253–260.

Li, Y., Chang, S., Tian, L., and Zhang, Q. (2020). Land use and mineral fertilization influ-

ence soil microbial biomass and residues: A case study of a chinese mollisol. *European Journal of Soil Biology*, 100:103216.

Li, Y. et al. (2021a). Residue quality drives decomposition and soil carbon dynamics in agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 159:108307.

Li, Y., Liu, X., Zhang, Q., Wang, R., Chen, X., and Li, H. (2021b). Integration of crop and livestock enhanced soil biochemical properties and microbial community structure. *Geoderma*, 381:114686.

Li, Y., Zhang, J., Wang, X., et al. (2025). Predominant effects of soil organic carbon quality on phosphatase activity in upland ultisols under long-term fertilizations. *Geoderma*, 455:116902.

Li, Y., Zhao, X., Chen, R., and Wang, H. (2024). Soil sulfur transformations driven by microbial enzymes in agroecosystems. *CATENA*, 241:107892.

Liang, C., Schimel, J. P., and Jastrow, J. D. (2024). The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5:54–67.

Liu, W. et al. (2021). Cellulose and hemicellulose degradation dynamics in agricultural soils. *Applied Soil Ecology*, 168:104120.

Liu, X. et al. (2022). Soil beta-glucosidase activity regulation and its ecological significance in carbon cycling under climate change. *Global Change Biology*, 28(7):2190–2204.

Liu, Y., Zhang, L., Li, Y., Wang, X., and Chen, M. (2024). Contrasting global patterns of soil microbial quotients of carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *CATENA*, 243:108145.

Lykov, I., Zaitsev, A., Gabibov, M., and Kudinov, A. (2020). Conversion of cropland to natural vegetation boosts microbial and enzyme activities in soil. *Science of The Total Environment*, 743:140829.

López, A. et al. (2023). Influence of humic acids on soil fertility and crop performance in tropical agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 340:108226.

Martins, L. F., Ferreira, E. P. B., Araújo, A. S. d. L., et al. (2023). Biochemical indicators of soil quality under integrated crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 356:108617.

Martins, P. S., Rodrigues, M. A., Gomes, P. L., Oliveira, D. C., Silva, B. R., and Fonseca, L. R. (2024). Sequestro de carbono em sistemas integrados de produção agropecuária. *Acta Scientiarum Agronomy*, 46:e63870.

Medina-Roldán, E. et al. (2023). Beta-glucosidase and arylsulfatase activities as indicators of soil microbial functionality under different land management regimes. *Ecological Indicators*, 150.

Mendes, I. C., Brossard, M., Luizao, F., and Chaer, G. M. (2021). Beta-glicosidase e arilsulfatase do solo em sistema agroflorestral e convencional: indicadores de saúde do solo. In *Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestrais*, volume 13, Manaus.

Mendes, I. C., Sousa, D. M. G. d., and Reis Junior, F. d. (2015). Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 32(1/2):9–29.

Mendes, I. C., Sousa, D. M. G. d., and Reis Junior, F. d. (2023). Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. Embrapa Cerrados.

Mendes, L. M. O. (2025). Acúmulo de carbono e fracionamento químico da matéria orgânica do solo em sistema de ilp. Master's thesis, Instituto Federal Goiano, Rio Verde.

Mendes, R. M. A. et al. (2020). Avaliação da atividade de arilsulfatase como bioindicador da qualidade do solo em sistemas agroflorestrais na amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44.

Mendonça, A. et al. (2023). Residue recalcitrance and persistence in tropical no-tillage systems. *Agronomy Journal*, 115(2):655–668.

Mettzer (2024). Resultados e discussão: o que é e como fazê-los?

Microsoft (2023). Visual studio code: code editing. redefined.

Morquillas, A. et al. (2022). Enzymatic activity of amylases and acid phosphatases in soil: a quantitative integrative review. *Revista de la Sociedad Brasileira de Ciência do Solo*, 46.

Mudgal, A., Singh, R. K., Kumar, P., and Singh, A. (2021). Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security – a review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5:100190.

Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M. T., et al. (2020). Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 71:347–361.

Nobre, C. A., Sampaio, G., de Souza Borma, L., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S., and Cardoso, M. (2023). Land-use and climate-change risks in brazilian agriculture. *Nature Climate Change*, 13:221–229.

Nolan, L., Bradley, M., and Ryan, N. (2021). Enzymes in soil: from molecular processes to ecosystem services. *Microbial Ecology*, 82:445–461.

Nunes, E. C. et al. (2022). Atividade e biomassa microbiana em solo sob diferentes usos e profundidades. *Revista da Ciência Agrônômica*, 53(1).

Oliveira, F. C., Souza, M. D., Collo, A. R., Oliveira, A. I. G., Valladares, G. S., and Pereira, M. G. (2021). Respiração basal da microbiota do solo: um indicador sensível de qualidade edáfica em sistemas agrícolas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 45.

Oliveira, J. M., Gollany, H. T., Polumsky, R. W., Madari, B. E., Leite, L. F. C., Machado, P. L. O. d. A., and Carvalho, M. T. (2022a). Predicting soil organic carbon dynamics of integrated crop-livestock system in brazil using the cqestr model. *Frontiers in Environmental Science*, 10:826786.

Oliveira, M. et al. (2022b). Carbon-to-nitrogen ratio controls decomposition and nutrient cycling in tropical residues. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 124(2):155–170.

Oliveira, M., Kassel, P., König, S., König, H. T., Wenzel, W. W., and Schmidt, H. P. (2019). Different efficiencies of grain legumes in crop rotations to improve soil aggregation and organic carbon in the short-term in a sandy cambisol. *Soil & Tillage Research*, 186:23–35.

Oliveira, M. H., Barbosa, L. R., Silva, C. A., and Mendes, I. C. (2023a). Soil biological indicators in integrated production systems under tropical conditions. *Agriculture*, 13(7):1458.

Oliveira, R., Silva, I. R., Ferreira, F. A., Carvalho, D. K. S., Santos, H. L., Ribeiro, M. R., and Silva, E. M. (2023b). Microbial enzyme activities as bioindicators of soil health under different land uses. *Soil Biology & Biochemistry*, 170:108669.

Ottoy, S. et al. (2022). Digital mapping of soil organic carbon hotspots in nature conservation areas. *Geoderma Regional*, 30:e00531.

Paulino, R. J. et al. (2023). Ácidos húmicos e fúlvicos: produtividade e sustentabilidade. In *Estudos em Ciências Agrárias*, pages 10–25. Editora Científica, São Paulo.

Paz, A. M., Sánchez, J., Moreno, C., and López, F. (2023). Soil microbial indicators under sustainable management: integrating fda activity and microbial respiration. *Ecological Indicators*, 152:110345.

Pereira, A. C., Silva, M. R. D., Almeida, L. T., Rocha, G. F., Oliveira, S. A., and Martins, R. P. (2024). Similaridades microbiológicas em solos sob pastagem e integração lavoura-pecuária. *Ciência Rural*, 54(3):e20230001.

Petry, C. et al. (2023). Integrated crop-livestock systems improve soil biological quality in tropical regions. *Agriculture*, 13(9):1768.

Petry, C., Flores, J. P. C., Anghinoni, I., Carvalho, P. C. d. F., and Silva, L. S. d. (2021). Forms and balance of soil potassium from a long-term integrated crop-livestock system in a subtropical oxisol. *Soil and Tillage Research*, 207:104864.

Philipp, L., Blagodatskaya, E., Tarkka, M., and Reitz, T. (2025). Soil microbial communities are more disrupted by extreme drought than by gradual climate shifts under different land-use intensities. *Frontiers in Microbiology*, 16:art. 1649443.

Portal DBO (2025). Ipf segue na casa dos 20 milhões de hectares. Portal DBO.

Qu, Q., Wang, Z., Gan, Q., Liu, R., and Xu, H. (2023). Impact of drought on soil microbial biomass and extracellular enzyme activity. *Frontiers in Plant Science*, 14:art. 1221288.

R Core Team (2025). R: a language and environment for statistical computing.

Raij, B. v., Andrade, J., Cantarella, H., and Quaggio, J. (2001). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Instituto Agronômico de Campinas, São Paulo.

Rego, C. A. R. M., Oliveira, P. S. R., Muniz, L. C., Rosset, J. S., Mattei, E., Costa, B. P., and Pereira, M. G. (2023). Chemical, physical, and biological properties of soil with pastures recovered by integration crop-livestock system in eastern amazon. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47:e0220094.

Reichardt, K. (1988). Capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 12.

Reis, R. B. et al. (2026). Integrated crop-livestock systems with crop diversification promote

soil carbon sequestration in tropical sandy soils. *Soil and Tillage Research*, 255:106623.

Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., and Yang, X. (2021). Indicators of soil physical quality and their applications. *Geoderma*, 404:115375.

Ribeiro, M. A., Pereira, J. H., and Santos, T. F. (2024). Structural polysaccharides of crop residues in integrated systems. *Agriculture*, 14(1):88.

Ribon, A. A., Backes, C., and Silva, L. L. (2023). Sistemas integrados de produção agropecuária e seus efeitos nos estoques de carbono do solo: uma meta-análise. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47:e0230089.

Ribon, A. A., Backes, C., Silva, L. L., et al. (2025). Impact of soil biochemical properties on yield and sustainability of integrated crop-livestock production systems without mineral fertilization. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 49:e0240123.

Rigrantec (2023). Substâncias húmicas: benefícios no manejo do solo e desenvolvimento da planta.

Rodella, A. A. et al. (1999). Calibrations for conductimetric determination of carbon dioxide. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(14):2059–2060.

Rodrigues, A. L., Ferreira, J. V., Silva, M. P., et al. (2024a). Land-use changes affect soil microbial processes and carbon dynamics in tropical agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 359:108770.

Rodrigues, A. L., Silva, M. P., Ferreira, J. V., et al. (2024b). Integration crop-livestock system increases the sustainability of soybean cultivation through improved soil health and plant physiology. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 359:108770.

Rodrigues, M. et al. (2022). Atividade enzimática da fosfatase ácida como indicador de qualidade do solo em sistemas agrícolas. *Ciência Rural*, 52(1).

Rosa, R. et al. (2021). Molecular characterization of humic acids extracted from soil organic matter: implications for soil fertility. *Environmental Science & Technology*, 55(13):9082–9090.

Rosset, J. S., Lana, M. C., Pereira, M. G., Schiavo, J. A., Cassol, C. J., and Moterle, D. F. (2016). Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em latossolo vermelho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9):1629–1638.

- RStudio Team (2025). Rstudio: integrated development environment for r.
- Rumpel, C., Lehmann, J., and Chabbi, A. (2021). Emerging concepts for soil organic matter characterization and monitoring. *European Journal of Soil Science*, 72(4):1345–1360.
- Salton, J. C. (2024). *Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo*. Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados.
- Salton, J. C., Mercante, F. M., Tomazi, M., et al. (2022). No-tillage system in tropical regions: crop residues and soil sustainability. *Soil and Tillage Research*, 223:105466.
- Salton, J. C., Mercante, F. M., Tomazi, M., et al. (2023). Integrated crop-livestock systems under no-tillage in brazil: advances in soil quality and sustainability. *Soil and Tillage Research*, 235:105874.
- Santos, A. et al. (2020). Fundamental role of soil microbiota in sustainable agriculture. *Soil Use and Management*, 36(1):25–35.
- Santos, C. M. A., Assmann, A. L., Cassol, L. C., et al. (2023a). Integrated crop-livestock systems and impacts on soil quality. *Agriculture*, 13:1048.
- Santos, C. M. A., Assmann, A. L., Cassol, L. C., et al. (2023b). Integrated crop-livestock systems and their impacts on soil quality and agricultural sustainability: a review. *Agriculture*, 13(5):1048.
- Santos, F. C. et al. (2022). Integração lavoura-pecuária-floresta como alternativa de intensificação sustentável para solos arenosos do oeste da bahia. Documentos 271, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas.
- Santos, J. B. et al. (2021). Organic matter management and microbial activity in no tillage systems. *Ciência e Agrotecnologia*, 45:e011.
- Santos, M. A., Silva, R. F., Carvalho, T. S., and Oliveira, J. R. (2024a). Fluorescein diacetate hydrolysis in tropical soils under different land-use systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48:e0230147.
- Santos, R. et al. (2024b). Residue quality and soil protection in integrated crop systems. *Soil Use and Management*, 40(1):89–101.
- Sarto, M. V. M., Borges, W. L. B., Sarto, J. R. W., Pires, C. A. B., Rice, C. W., and Rosolem,

- C. A. (2020). Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. *Applied Soil Ecology*, 145:103350.
- Scheid, D. L., da Silva, R. F., da Silva, V. R., Ros, C. O. D., Pinto, M. A. B., Gabriel, M., and Cherubin, M. R. (2020). Changes in soil chemical and physical properties in pasture fertilised with liquid swine manure. *Scientia Agricola*, 77(5):e20190017.
- Schiavo, J. A., Lopes, V. R., Araújo, A. R., Macedo, M. C. M., et al. (2025). Integrated crop–livestock–forest systems with no-till can restore soil organic carbon stocks in a brazilian ferralsol. *Applied and Environmental Soil Science*, 2025:art. 8491885.
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., et al. (2023). Soil organic matter as an ecosystem property: emerging concepts. *Soil Biology and Biochemistry*, 183:109024.
- Schnitzer, M. (1972). *Humic substances in the environment*. Marcel Dekker, New York.
- Schnürer, J. (1982). Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Applied and Environmental Microbiology*, 43(6):1256–1261.
- Schulze, K. A., Thompson, R. B., Davies, C. A., and Norton, L. R. (2024). Soil resilience to climate variability in contrasting land management systems across europe. *Global Change Biology*, 30(2):1–16.
- Searchinger, T. D., Clark, M., Deryng, D., et al. (2021). Revising agricultural policies to meet food, climate, and biodiversity goals. *Science*, 374(6568):eabf1468.
- Sekaran, U., Kumar, S., and Gonzalez-Hernandez, J. L. (2021). Integration of crop and livestock enhanced soil biochemical properties and microbial community structure. *Geoderma*, 381:114686.
- Silva, D. P., Almeida, C. P., and Ferreira, J. V. (2024a). Integração lavoura-pecuária e seus efeitos na qualidade do solo. *Agronomy Journal*, 115(2):834–842.
- Silva, E. F. et al. (2022). Indicadores bioquímicos, biológicos e carbono das frações da matéria orgânica do solo em função do cultivo de plantas de cobertura e soja em sucessão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46:e0210123.
- Silva, E. F., Lourente, E. P. R., Marchetti, M. E., Mercante, F. M., Ferreira, A. C. T., and Lopes, A. S. (2011). Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(10):1321–1331.

- Silva, E. M. et al. (2023a). Atividade enzimática do solo como indicador de qualidade em sistemas agrícolas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47:1–12.
- Silva, J. C. (2024). Implicações técnicas e ambientais em diferentes sistemas de manejo. Master's thesis, Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente.
- Silva, P. C. G. d. et al. (2020). No-tillage and crop rotation increase crop yields and nitrogen stocks in sandy soils under agroclimatic risk. *Field Crops Research*, 258:1–9.
- Silva, R. A. et al. (2021). Restauração ecológica de solos degradados no cerrado brasileiro: indicadores biológicos e químicos. *Revista Árvore*, 45:1–15.
- Silva, R. F., Lima, S. P., Souza, A. L., Costa, F. F., Gomes, J. F., and Ferreira, L. C. (2023b). Biomassa microbiana e fosfatase em solos de áreas de floresta nativa. *Revista de Ciências Agrárias*, 46(1):110–118.
- Silva, R. F., Oliveira, M. H., Santos, R. A., et al. (2024b). Residue persistence of tropical grasses under no-tillage systems. *Agronomy*, 14(2):317.
- Silva, R. F., Souza, M. A., Oliveira, B. T., et al. (2024c). Diversity of crop-livestock systems in the brazilian cerrado and sustainability outcomes. *Agronomy*, 14(3):512.
- Singh, J. et al. (2021). Soil enzyme activities as bioindicators of soil quality and productivity. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 23.
- Singh, N., Asha, and Maurya, K. V. (2025). Soil health and bioindicators. *Agrarian Academy*.
- Siqueira, K. T. et al. (2020). Respiração da biomassa microbiana do solo em sistemas agroflorestais e agrícolas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55.
- Soares, J. M. (2021). Atividade da fosfatase ácida e alcalina em solo adubado com dejetos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 45.
- Soil Aggregate Dynamics and Stability (2025). Soil aggregate dynamics and stability: Natural and anthropogenic drivers. *Agriculture*, 15(23):2500.
- Sousa, M. V., Ferreira, J. P., Lima, C. E., Pereira, A. L., and Silva, R. M. (2024). Biological indicators as tools for soil quality assessment in tropical agroecosystems. *Soil Use and Management*, 40(2):e13041.

- Sousa, R. et al. (2023). Crop residue decomposition and nutrient release in tropical integrated systems. *Agronomy*, 13(4):1021.
- Speranza, J. S., de Souza Costa Junior, C., Pereira, L. M., et al. (2023). Brazilian agriculture in the context of global food security and climate sustainability. *Agricultural Systems*, 205:103581.
- Stott, D. E. (2019). Recommended soil health indicators and associated laboratory procedures. Technical Report 450-03, USDA.
- Stradioto, M. R. et al. (2020). Caracterização diagenética e litológica dos arenitos do grupo bauru no estado de são paulo. *Ciência e Natura*, 42:e88.
- Swift, R. S. (1996). Organic matter characterization. In *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*, pages 1018–1020. Soil Science Society of America, Madison.
- Swisher, R. (1980). Fluorescein diacetate hydrolysis as an estimator of microbial biomass on coniferous needle surface. *Microbial Ecology*, 6:217–226.
- Tabatabai, M. (1994). Soil enzymes. In *Methods of soil analysis: part 2; microbiological and biochemical properties*, pages 775–883. SSSA.
- Tabatabai, M. et al. (1970). Arylsulfatase activity of soils. *Soil Science Society of American Proceedings*, 34:225–229.
- Tadini, A. M., Bernardi, A. C. C., Milori, D. M. B. P., Oliveira, P. P. A., Pezzopane, J. R. M., Colnago, L. A., Hatcher, P. G., and Martin-Neto, L. (2022a). Chemical characteristics of soil organic matter from integrated agricultural systems in southeastern brazil. *European Journal of Soil Science*, 73(1):e13136.
- Tadini, A. M., Nicolodelli, G., Senesi, N., Martin-Neto, L., and Milori, D. M. B. P. (2022b). Spectroscopic characteristics of humic acids extracted from soils under different integrated agricultural production systems in tropical regions. *Geoderma Regional*, 28:e00476.
- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., et al. (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, 6(45):eaba1715.
- Teixeira, C. M. (2023). Indicadores biológicos para avaliação da qualidade de solos em agricultura tropical. *Soil Science Society of America Journal*, 87(2):234–248.

- Teixeira, D. C. F. (2022). O clima urbano das cidades de pequeno porte do oeste paulista: análise das características térmicas. *Revista Brasileira de Climatologia*, 30.
- Teixeira, M. et al. (2022). Crop residue quality influences decomposition and soil cover persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 326:107807.
- Valani, G. P., Martini, A. F., Silva, L. F. S., and Bovi, R. C. (2021). Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. *Soil Use and Management*, 37:3–22.
- Van Os, G. J. et al. (2001). Suppression of pythium root rot in bulbous iris in relation to biomass and activity of the soil microflora. *Soil Biology & Biochemistry*, 33(11).
- Van Rossum, G. and Drake, F. L. (2023). *Python: reference manual*. Python Software Foundation.
- Vanolli, B. d. S. et al. (2025). Crop–livestock integrated systems improve soil health in tropical sandy soils. *Agronomy*, 15(2):378.
- Vasconcelos, A. C. et al. (2021). Enzimas edáficas como indicadores de qualidade biológica de solos. *Ciência do Solo*, 45(3):1–18.
- Vieira, A. (2025). Avaliação in vitro da aplicabilidade de bioindicadores na qualidade do solo. Master's thesis, Universidade Federal da Integração Latini-Americana, Foz do Iguaçu.
- Vikram, N. et al. (2022). Properties of humic acid substances and their effect in soil. In *Humic Substances*. IntechOpen.
- Wang, F. et al. (2020). Dynamics of soil beta-glucosidase activity in relation to organic matter decomposition in tropical agroecosystems. *Soil & Tillage Research*, 197.
- Wang, H., Zhou, J., Liu, X., and Li, Q. (2022a). Dehydrogenase activity reflects microbial functional changes under contrasting agricultural management. *Soil Biology and Biochemistry*, 171:108732.
- Wang, J., Liu, X., Zhou, J., and Chen, H. (2023a). Soil microbial nutrient cycling and organic matter transformation under agricultural management. *Soil Biology and Biochemistry*, 182:109012.
- Wang, N. et al. (2024). Soil pore structure and its research methods: A review. *Soil and*

Water Research, 19(1):1–24.

Wang, Q., He, N., Zou, X., et al. (2021a). Global patterns and controls of soil respiration in agricultural ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 319:107604.

Wang, X. et al. (2023b). Arylsulfatase activity response to land-use change: a meta-analysis. *Geoderma*, 425:116019.

Wang, Y. et al. (2022b). Carbon and nitrogen interactions during residue decomposition in croplands. *Science of the Total Environment*, 806:150627.

Wang, Y., Li, X., Zhang, M., Chen, H., and Liu, P. (2022c). Carbon and nitrogen interactions during crop residue decomposition in agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 806:150627.

Wang, Y., Li, X., and Zhou, J. (2021b). Structural carbohydrates and decomposition in crop residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 158:108286.

Weber, J. et al. (2024). Changes in soil humin macromolecular structure resulting from long-term catch crop application. *Molecules*, 29(10):2337.

Wei, H., Zhang, J., Chen, Y., Li, Q., and Wang, H. (2021). Soil enzymatic indicators reveal microbial responses to agricultural intensification. *Soil Biology and Biochemistry*, 161:108392.

Xu, X. et al. (2022). Lignin chemistry and its impacts on plant residue decomposition. *Frontiers in Microbiology*, 13:845786.

Zapata-Hernández, I. et al. (2022). Biological activity in soils treated with green manures using fluorescein diacetate hydrolysis and arylsulfatase activity. *International Journal of Plant & Soil Science*, 34(10):540–550.

Zhang, H., Li, X., and Sun, J. (2021). Sulfur mineralization and enzyme activities in agricultural soils under different management systems. *Geoderma*, 405:115414.

Zhang, H., Li, X., and Sun, J. (2022a). Microbial control of organic nitrogen transformation in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 169:108659.

Zhang, L., Sun, X., Liu, C., et al. (2022b). Plant maturity affects cellulose accumulation and residue decomposition in cropping systems. *Agronomy*, 12(7):1583.

Zhang, L., Wang, X., Chen, Y., and Sun, H. (2023a). Soil enzyme activities under land use changes: dehydrogenase as a key microbial indicator. *Catena*, 230:107291.

Zhang, Y., Chen, X., Liu, M., Wang, P., and Sun, H. (2023b). Humic fractions regulate cation retention and trace element mobility in highly weathered tropical soils. *Chemosphere*, 337:139404.

Zhao, Y., Li, M., Wang, S., Zhang, C., Sun, Z., and Liu, X. (2024). Spatial distribution and driving factors of soil organic carbon in the northeast china plain: Insights from latest monitoring data. *Science of The Total Environment*, 911:168602.

Zhou, J. et al. (2021). Nitrogen availability regulates microbial decomposition of crop residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 157:108239.

Zhou, X. et al. (2020a). Effects of land use and agricultural practices on microbial beta-glucosidase activity in subtropical soils. *Geoderma*, 374.

Zhou, Z., Wang, C., and Luo, Y. (2020b). Effects of nitrogen enrichment on soil microbial characteristics: from biomass to enzyme activities. *Geoderma*, 366:114256.

ANEXO

ROTINA LABORATORIAL PARA O FRACIONAMENTO QUÍMICO DA MATÉRIA ORGÂNICA MARCELLO CUNHA – DOUTORANDO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Análise do Carbono – Extração de Substâncias Húmicas Dia 1 –

1. Pesar 1,0 g de solo (TFSA) – "das caixinhas" previamente numeradas e identificadas por tratamento e nas diferentes profundidades.
2. Acondicionar essa 1,0 g em tubos do tipo Falcon (tubos de centrífuga de 50 ml)
3. Pipetar 10 ml de **solução NaOH 0,1 mol l⁻¹** em cada tubo
4. Agitar em agitador vertical manual (agitador manual)
5. Levar esses tubos Falcon para a centrífuga em rotação de 6000 rpm por 1 hora
6. Colocá-los em grade receptora e levá-los para descansar por 24 horas na geladeira.

OBS: Para o preparo da **solução NaOH 0,1 mol l⁻¹ (S1)**

S1 – Dissolver 8 g de NaOH em 800 ml de água deionizada em um Becker de 1 litro, transferir para balão volumétrico de 2000 ml (2 litros) e completar com água deionizada.

A quantidade de solução a ser preparada, variará de acordo com o número de amostras a serem executadas nos dois primeiros dias de trabalho (3 centrifugações por 2 dias/tubo Falcon)

Cálculo:

Ex.: Se tivermos 20 amostras (20 tubos Falcon) iremos utilizar 20 x 10 ml solução NaOH 0,1 mol l⁻¹ x 3 centrifugações = 600 ml de solução S1.

Dia 2 –

Etapa 1:

7. Retirar os Tubos Falcon acondicionados na geladeira após o período de 24 horas;

8. Pipetar o sobrenadante dos Tubos Falcon com pipeta calibrada para 10 ml e ponteira adequada para ela.
9. Transferir este sobrenadante para copos descartáveis de 100 ml
10. Pipetar novamente 10 ml de solução NaOH 0,1 mol l⁻¹ para cada tubo
11. Agitar manualmente (em agitador de tubos calibrado na escala 2-3)
12. Deixar descansar por 1 hora em "grade receptora"
13. Centrifugar novamente a 3000 rpm por 20 min
14. Retirar os tubos da centrífuga e pipetar novamente os sobrenadantes colocando-o nos mesmos copos plásticos de 100 ml

Etapa 2:

15. Pipetar novamente 10 ml de solução NaOH 0,1 mol l⁻¹ para cada tubo
16. Agitar manualmente (em agitador de tubos calibrado na escala 2-3)
17. Deixar descansar por 1 hora em "grade receptora"
18. Centrifugar novamente a 3000 rpm por 20 min
19. Retirar os tubos da centrífuga e pipetar novamente os sobrenadantes colocando-o nos mesmos copos plásticos de 100 ml

Etapa 3:

20. O material sólido que restou no fundo dos Tubos Falcon após a retirada do sobrenadante, deverá ser levado nos próprios tubos para a estufa, calibrada a 45 °C por 72 horas.
21. Nestes Tubos, esse material sólido após seu secamento, será utilizado para a determinação da fração HUMINA – ao final será utilizado este material para a QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO DA FRAÇÃO HUMINA;
22. O sobrenadante coletado nos copos plásticos (chamado a partir de agora de EXTRATO ALCALINO). Este extrato alcalino contém as frações de ácidos húmicos (FAH) e a fração de fúlvicos (FAF).

23. Esse extrato alcalino terá seu pH aferido para a escala (1,98-2,06) com solução de ácido sulfúrico H₂SO₄ (20%), com a utilização de um pHmetro.
24. Ajustando o pH das frações FAH e FAF (sobrenadantes nos copos de plástico) – metodologia simples, feita através da adição do ácido sulfúrico (20%) gota a gota na solução sobrenadante e finalizado com uma solução diluída do mesmo em água deionizada até atingirem-se valores compreendidos entre (1,98-2,06). CUIDADO AO ADICIONAR AS GOTAS DE ÁCIDO. UTILIZAR LUVAS DURANTE TODO O PROCESSO e OBSERVAR A VARIAÇÃO DO pH para a faixa desejada.

OBS.: A cada utilização do pHmetro em nova solução do EXTRATO ALCALINO, proceder a lavagem do mesmo com água deionizada, enxugá-lo com papel toalha e recolocação em nova amostra.

25. As soluções de FAH e FAF após ajustados os seus pHs deverão ser transferidas para novos Tubos Falcon de 50 ml (devidamente identificados), recolocados nas grades receptoras, envolvidos em papel celofane e acondicionados em geladeira por um período de 18 horas.

Dia 3 -

26. Após passado esse período de 18 horas, retirar os Tubos Falcon da geladeira. Neles encontrar-se-ão os precipitados finais da fração húmica.
27. Decorrido este tempo (18 horas), centrifugar os tubos Falcon a 3000 rpm por 5 minutos
28. O sobrenadante contém a FAF que será transferida para balão de 50 ml e terá seu volume aferido com água deionizada (balões previamente aferidos e calibrados com balões de referência do laboratório).
29. Repetir esse procedimento para cada amostra, lavando-se o balão de calibração após cada uso com água deionizada, para só então proceder uma nova aferição da amostra seguinte.

30. Esta fração FAF deverá ser transferida para copos plásticos de 100 ml devidamente identificados (FAF – n° amostra) = X copos referentes ao número de amostras processadas. No nosso caso de hoje 20 copos com FAF
31. **Ao precipitado retido no fundo dos tubos Falcon, agora denominados de FAH, adicionar 30 ml de solução NaOH 0,1 mol l⁻¹ e transferir para balões de 50 ml completando o volume com solução de NaOH 0,1 mol l⁻¹**

OBS.: Para esta etapa não fazer a diluição com água deionizada como feito para a fração FAF!!!! ATENÇÃO!!!!

Dia 4 – QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO DAS FRAÇÕES AH E AF

32. Pipetar 5 ml do estrato da fração AF e AH para tubos de digestão de 100 ml (no nosso caso inicial serão 20 tubos de AF e 20 tubos de AH = 40 tubos de digestão de 100 ml)
33. Adicionar 10 ml da solução 0,033 mol l⁻¹ de Dicromato de Potássio e, em seguida lentamente, mais 10 ml de solução de Ácido Sulfúrico Concentrado.
34. Aquecer o Bloco Digestor até que ele atinja a temperatura de 170 °C
35. Colocar os tubos de digestão no Bloco Digestor e deixá-los aquecer por 30 min (INCLUIR AQUI OS 3 BRANCOS COM AQUECIMENTO)

OBS.:

- BRANCOS DE PADRONIZAÇÃO SEM AQUECIMENTO (10 ml de Dicromato de Potássio + 10 ml de ácido Sulfúrico)
- BRANCOS DE PADRONIZAÇÃO COM AQUECIMENTO (10 ml de Dicromato de Potássio + 10 ml de Ácido Sulfúrico)
- **Preparo da solução PADRONIZADORA de SULFATO FERROSO AMONICAL – DEVE SER PREPARADA NA HORA**

– Concentração de 0,03 mol l⁻¹ = para AH e AF

– Concentração de $0,10 \text{ mol l}^{-1}$ = HUMINA

36. Retirá-los após os 30 min e deixar esfriar em torno de 15-20 min
37. Transferir quantitativamente o conteúdo de cada tubo para erlenmeyers de 250 ml, em seguida, completar com água deionizada até o volume final de 80 ml (estes erlenmeyers são previamente calibrados antes da operação) – 40 erlenmeyers para esta etapa.
38. Deixar a solução esfriar até a temperatura ambiente
39. Adicionar 5 gotas da solução indicadora (FERROIN) e titular com a solução de Sulfato Ferroso Amoniacal $0,03 \text{ mol l}^{-1}$.
40. Proceder a titulação até que o ponto de viragem indique a passagem da cor verde para violeta/vermelho.

Dia 5 – QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO DA FRAÇÃO HUMINA

41. Pesar aproximadamente 0,5 g da fração HUMINA (que foi para a centrífuga, raspada e pesada) e enquanto isso colocar o bloco digestor para aquecer até a temperatura de 170°C .
42. Colocar essas 0,5 g em tubos de digestão e adicionar 5 ml da solução de DICROMATO DE POTÁSSIO $0,167 \text{ MOL L}^{-1}$ com a ajuda de uma pipeta volumétrica com ponteira própria e em seguida acrescentar 15 ml de Ácido Sulfúrico Concentrado.
43. Após o pré aquecimento do bloco digestor até a temperatura de 170°C , os tubos devem ser colocados no bloco digestor e mantidos nessa temperatura por 30 min
44. Deixar esfriar por 15-20 min.
45. Transferir quantitativamente o conteúdo de cada tubo para Erlenmeyer de 250 ml, utilizando-se água deionizada suficiente para o volume final de 80 ml
46. Deixar a solução esfriar até a temperatura ambiente

47. Adicionar 0,3 ml da solução indicadora de FERROIN e titular com a solução de SULFATO FERROSO AMONIACAL $0,1 \text{ mol l}^{-1}$. Observar o ponto de viragem que passará de uma coloração verde para violeta-escuro. ATENÇÃO TOTAL DO OBSERVADOR!!!
48. Nas mesmas condições devem ser feitos pelo menos 6 BRANCOS CONTROLES (5 ml de DICROMATO DE POTÁSSIO $0,167 \text{ mol l}^{-1}$ + 15 ml ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO) 3 desses brancos devem ser levados para a digestão e os outros 3 permanecendo em temperatura ambiente.
49. O branco em temperatura ambiente é importante para o cálculo do total do dicromato perdido no aquecimento.