



JULIÁN ORLANDO SANDOVAL CUÉLLAR

**INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE
ASOCIADOS COM A PRODUTIVIDADE E COM SISTEMAS
DE MANEJO DO CAFEEIRO EM ÁREAS DOS DOMÍNIOS
MATA ATLÂNTICA E CERRADO DE MINAS GERAIS**

**LAVRAS - MG
2025**

JULIÁN ORLANDO SANDOVAL CUÉLLAR

**INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO ASSOCIADOS
COM A PRODUTIVIDADE E COM SISTEMAS DE MANEJO DO CAFEEIRO EM
ÁREAS DOS DOMÍNIOS MATA ATLÂNTICA E CERRADO DE MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, área de
concentração em Microbiologia e Bioquímica do
Solo, para a obtenção do título de Doutor.

Profa Dra Fatima Maria de Souza Moreira
Orientadora
Dra. Silvia Maria de Oliveira Longatti
Coorientadora

**LAVRAS - MG
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Catalogação da Biblioteca Universitária da UFLA

Cuéllar, Julián Orlando Sandoval.

Indicadores microbiológicos de qualidade do solo associados com a produtividade e com sistemas de manejo do cafeeiro em áreas dos domínios Mata Atlântica e Cerrado de Minas Gerais / Julián Orlando Sandoval Cuéllar. - 2025.

118 p. : il.

Orientador(a): Fatima Maria de Souza Moreira.

Coorientador(a): Silvia Maria de Oliveira Longatti.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. *Coffea arabica* L. 2. Floresta. 3. Bioindicadores. I. Moreira, Fatima Maria de Souza. II. de Oliveira Longatti, Silvia Maria. III. Título.

Ficha elaborada por André Felipe Calsavara (CRB6/3137)

JULIÁN ORLANDO SANDOVAL CUÉLLAR

**MICROBIOLOGICAL INDICATORS OF SOIL QUALITY ASSOCIATED WITH
PRODUCTIVITY AND MANAGEMENT SYSTEMS OF COFFEE TREE IN AREAS
OF THE ATLANTIC FOREST AND CERRADO DOMAINS OF MINAS GERAIS**

**INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO ASSOCIADOS
COM A PRODUTIVIDADE E COM SISTEMAS DE MANEJO DO CAFEEIRO EM
ÁREAS DOS DOMÍNIOS MATA ATLÂNTICA E CERRADO DE MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, área de
concentração em Biologia, Microbiologia e
Processos Biológicos do Solo, para a obtenção do
título de Doutor.

Aprovada em 27 de setembro de 2024.

Dra. Fatima Maria de Souza Moreira

Dr. Diego Tassinari

Dra. Elaine Martins da Costa

Dra. Márcia Rufini

Dr. Osnar Obede da Silva Aragão

DCS/UFLA

DCS/UFLA

CPCE/UFPI

DCS/UFLA

DE/IFPA

Profa. Dra. Fatima Maria de Souza Moreira
Orientadora

Dra. Silvia Maria de Oliveira Longatti
Coorientadora

**LAVRAS - MG
2025**

AGRADECIMENTOS

Quero expressar o meu profundo agradecimento à minha família pelo seu apoio incondicional durante todo o processo dos estudos. As palavras de encorajamento fundamentais para me manter motivado e perseverar nos momentos de dificuldade.

À minha filha Kelsii e à minha doce Ana, por serem minha maior motivação e inspiração diária. Sua alegria, energia e coragem me ensinam, a cada dia, a enfrentar os desafios com determinação e amor incondicional.

Agradecer a equipe que contribuiu mais diretamente com esse trabalho: Silvia Longatti, Márcia Rufini, Amanda Azarias, Jacqueline Savana e todos os técnicos dos laboratórios do Departamento.

Agradecer à (UFLA) e ao Programa de Pós-graduação em Ciência do solo pela oportunidade, acolhimento e apoio, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo auxílio financeiro e bolsa de estudos necessárias para a realização desse trabalho. Esta tese faz parte do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia: Biodiversidade do Solo.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao professor Teotonio Soares de Carvalho, cuja ética profissional e caráter exemplar foram fundamentais ao longo desta jornada. Suas contribuições foram importantes para a concretização deste projeto, e sua orientação e generosidade sempre inspiraram meu caminho acadêmico e pessoal.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha orientadora, à Professora Fatima Moreira por sua contribuição significativa para este trabalho e por ter sido uma mentora excepcional.

RESUMO GERAL

A produção de café tem grande importância econômica e social no Brasil e em Minas Gerais. O setor cafeeiro enfrenta desafios significativos para aumentar a eficiência, sendo a qualidade do solo um fator essencial para sustentar a produção. Nesse contexto, os indicadores microbiológicos são ferramentas valiosas para monitorar e prever alterações na qualidade do solo, devido à sua sensibilidade e potencial de diagnóstico nos sistemas de manejo como demonstrado por Aragão et al. (2020) na cultura do café, em uma condição homogênea no município de Patrocínio, Minas Gerais. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a associação entre indicadores microbiológicos do solo e a produtividade da cultura do café no domínio da Mata Atlântica, mas agora em condições heterogêneas e, também comparar o impacto dos diferentes sistemas de produção de café na qualidade do solo no Cerrado. Para tanto, foram coletadas amostras de solo no município de Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, em duas propriedades: Fazenda da Lagoas, e Fazenda Samambaia. As amostras foram obtidas nos períodos seco de 2021 e úmido de 2022, de cinco pares de talhões sob condições de produção similares, sendo cada par composto por um talhão de maior e outro de menor produtividade, destacando-se as condições de heterogeneidade entre os cinco pares selecionados. No Cerrado, foram coletadas amostras em sete fazendas no município de Patrocínio, incluindo seis talhões sob sistema convencional, seis sob sistema regenerativo de café e seis áreas de floresta nativa. O procedimento experimental consistiu na coleta de cinco amostras compostas em cada talhão. Os seguintes atributos microbiológicos foram avaliados: Carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal microbiana (RBM), quociente metabólico (qCO_2), atividades das enzimas urease (Ur), β -glicosidase (β -gli), arilsulfatase (Aril), fosfatase ácida (Fosf) e hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA). Os atributos químicos e físicos foram: textura, pH, matéria orgânica (MOS) e nutrientes. No domínio da Mata Atlântica os indicadores microbianos, CBM, Ur, β -gli, Aril permitiram discriminar, principalmente na época seca, talhões com diferentes níveis de produtividade e foram positivamente associados com as maiores produtividades do cafeeiro. Na estação úmida apenas o CBM e Ur, se associaram com as áreas de maiores produtividades. Por outro lado, o qCO_2 associou-se às áreas de menor produtividade. No Cerrado, as áreas de floresta nativa apresentaram maior atividade dos indicadores microbiológicos do solo CBM, RBM, Aril, FDA, Fosf e Ur, os quais se correlacionaram positivamente com essas áreas em comparação às áreas de cafeeiro nas duas estações. No sistema de manejo de café regenerativo, foram observados maiores valores dos indicadores CBM e das atividades enzimáticas, como Aril e FDA, durante a estação seca. Na estação úmida, os indicadores CBM, RBM, Aril, β -gli, FDA, Fosf e Ur apresentaram maiores valores, seguidos pelos resultados do sistema de manejo de café convencional.

PALAVRAS-CHAVE: *Coffea arabica* L. Bioindicadores.

GENERAL ABSTRACT

Coffee production has great economic and social importance in Brazil and Minas Gerais. The coffee sector faces significant challenges to increase efficiency, with soil quality being an essential factor to sustain production. In this context, microbiological indicators are valuable tools for monitoring and predicting changes in soil quality, due to their sensitivity and diagnostic potential in management systems, as demonstrated by Aragão et al. (2020) in coffee crops, under a homogeneous condition in the municipality of Patrocínio, Minas Gerais. Therefore, this study aims to evaluate the association between soil microbiological indicators and coffee crop productivity in the Atlantic Forest domain, but now under heterogeneous conditions, and also to compare the impact of different coffee production systems on soil quality in the Cerrado. For this purpose, soil samples were collected in the municipality of Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, on two properties: Fazenda da Lagoas and Fazenda Samambaia. The samples were obtained in the dry season of 2021 and the wet season of 2022, from five pairs of plots under similar production conditions, each pair consisting of a plot with higher and a lower productivity, highlighting the heterogeneity conditions between the five selected pairs. In the Cerrado, samples were collected from seven farms in the municipality of Patrocínio, including six plots under a conventional system, six under a regenerative coffee system, and six native forest areas. The experimental procedure consisted of collecting five composite samples from each plot. The following microbiological attributes were evaluated: Microbial biomass carbon (MBC), microbial basal respiration (MBR), metabolic quotient (qCO_2), activities of the enzymes urease (Ur), β -glucosidase (β -gly), arylsulfatase (Aryl), acid phosphatase (Phosph), and fluorescein diacetate hydrolysis (FDA). The chemical and physical attributes were: texture, pH, organic matter (SOM) and nutrients. In the Atlantic Forest domain, the microbial indicators, CBM, Ur, β -gly and Aril allowed to discriminate, mainly in the dry season, plots with different levels of productivity and were positively associated with the highest coffee productivity. In the wet season, only CBM and Ur were associated with the areas of highest productivity. On the other hand, qCO_2 was associated with the areas of lowest productivity. In the Cerrado, the native forest areas presented greater activity of the soil microbiological indicators CBM, RBM, Aril, ADF, Fosf and Ur, which were positively correlated with these areas compared to the coffee areas in both seasons. In the regenerative coffee management system, higher values of CBM indicators and enzymatic activities, such as Aril and ADF, were observed during the dry season. In the wet season, the CBM, RBM, Aril, β -gly, FDA, Phosph and Ur indicators showed higher values, followed by the results of the conventional coffee management system.

KEY WORDS: *Coffea arabica* L. Bioindicators.

INDICADORES DE IMPACTO

A produção de café é essencial para a economia brasileira, especialmente em Minas Gerais, gerando empregos e renda. No entanto, a sustentabilidade da cafeicultura depende da qualidade do solo, fator determinante para a produtividade e viabilidade do setor. Este estudo avaliou a relação entre indicadores microbiológicos do solo e a produtividade do café nos biomas Mata Atlântica e Cerrado, considerando diferentes sistemas de manejo. Os impactos sociais e econômicos refletem-se no fortalecimento de práticas agrícolas sustentáveis, promovendo sistemas produtivos que preservam a saúde do solo e aumentam a rentabilidade dos cafeicultores. A identificação de bioindicadores eficazes pode reduzir o uso excessivo de insumos químicos, diminuindo custos de produção e aumentando a competitividade. Além disso, os dados gerados subsidiam políticas públicas e assistência técnica para a cafeicultura. No aspecto ambiental, os resultados mostram que sistemas regenerativos de produção possuem maior atividade microbiológica e qualidade do solo, aproximando-se de áreas de floresta nativa. Isso sugere que práticas sustentáveis mitigam a degradação do solo e favorecem a conservação da biodiversidade, reduzindo impactos negativos dos manejos convencionais. Embora já evidentes em nível experimental, os impactos deste estudo têm grande potencial de expansão, especialmente quando aplicados em programas de extensão rural e inovação tecnológica. A disseminação desses conhecimentos pode estimular a adoção de práticas sustentáveis na cafeicultura, equilibrando produtividade e conservação ambiental. Os impactos se enquadram em três áreas temáticas da Política Nacional de Extensão: Meio ambiente, ao incentivar manejos sustentáveis; Tecnologia e produção, ao propor bioindicadores microbiológicos como ferramenta de monitoramento do solo; e Trabalho, ao capacitar técnicos e agricultores para aprimorar as condições laborais no campo. Além disso, o estudo contribui para quatro Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU: ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável, ao impulsionar práticas agrícolas que aumentam a produtividade de forma responsável; ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis, ao reduzir o uso excessivo de insumos químicos; ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima, ao estimular sistemas regenerativos e práticas conservacionistas; e ODS 15 - Vida Terrestre, ao favorecer a conservação da biodiversidade e a recuperação da qualidade do solo. Dessa forma, a pesquisa fortalece a sustentabilidade da cafeicultura, promovendo benefícios sociais, econômicos e ambientais alinhados à Agenda 2030.

IMPACT INDICATORS

Coffee production is essential to the Brazilian economy, especially in Minas Gerais, generating jobs and income. However, the sustainability of coffee farming depends on soil quality, a determining factor for the productivity and viability of the sector. This study evaluated the relationship between soil microbiological indicators and coffee productivity in the Atlantic Forest and Cerrado biomes, considering different management systems. The social and economic impacts are reflected in the strengthening of sustainable agricultural practices, promoting production systems that preserve soil health and increase the profitability of coffee farmers. The identification of effective bioindicators can reduce the excessive use of chemical inputs, reducing production costs and increasing competitiveness. In addition, the data generated support public policies and technical assistance for coffee farming. In the environmental aspect, the results show that regenerative production systems have greater microbiological activity and soil quality, approaching native forest areas. This suggests that sustainable practices mitigate soil degradation and promote biodiversity conservation, reducing the negative impacts of conventional management. Although already evident at an experimental level, the impacts of this study have great potential for expansion, especially when applied to rural extension and technological innovation programs. The dissemination of this knowledge can stimulate the adoption of sustainable practices in coffee farming, balancing productivity and environmental conservation. The impacts fall into three thematic areas of the National Extension Policy: Environment, by encouraging sustainable management; Technology and production, by proposing microbiological bioindicators as a soil monitoring tool; and Labor, by training technicians and farmers to improve working conditions in the field. In addition, the study contributes to four UN Sustainable Development Goals (SDGs): SDG 2 - Zero Hunger and Sustainable Agriculture, by promoting agricultural practices that increase productivity in a responsible manner; SDG 12 - Responsible Consumption and Production, by reducing the excessive use of chemical inputs; SDG 13 - Climate Action, by encouraging regenerative systems and conservation practices; and SDG 15 - Life on Land, by promoting biodiversity conservation and soil quality recovery. In this way, research strengthens the sustainability of coffee farming, promoting social, economic and environmental benefits aligned with the 2030 Agenda.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fazendas NKG Lagoas (superior) e Samambaia (inferior), e pontos de amostragem em amarelo nos cinco pares de talhões selecionados.	40
Figura 2. Desenho de amostragem para colheita de amostras simples de solo, para conformar amostras compostas nas áreas cafeeiras por talhão	43
Figura 3. Indicadores microbiológicos do solo em áreas de café com baixa e alta produtividade durante a estação seca (à esquerda) e chuvosa (à direita).	51
Figura 4. Atividade enzimática do solo para áreas de café com baixa e alta produtividade na estação seca (à esquerda) e chuvosa (à direita).	55
Figura 5 Análise de componentes principais (PCA) em talhões com diferentes níveis de produtividade.	57
Figura 6. Análise de componentes principais (PCA) em talhões com diferentes níveis de produtividade. a) atributos microbiológicos, (a) estação seca, (b) estação chuvosa.	59
Figura 7. Localização do município de Patrocínio, estado de Minas Gerais, Brasil.	76
Figura 8. Desenho do transecto, 5 pontos de amostragem, equidistantes a cada 50 m para realizar coleta de solo, área de sistema de floresta nativa e sistema de produção de café, Fazendas 5	78
Figura 9. Procedimento de coleta de solo com uso do trado holandês, amostras simples de solo na projeção da copa das plantas,	78
Figura 10. Gráfico de diferenças ou contrastes com intervalos de confiança.	85
Figura 11. Gráfico de diferenças ou contrastes com intervalos de confiança.	90
Figura 12. Análise de componentes principais (PCA) Atributos da fertilidade.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Consolidado de pesquisas.	25
Tabela 2. Produtividade por safra em sacos de café por hectare, dos talhões das fazendas NKG e Samambaia nos períodos 2021 – 2022.....	41
Tabela 3. Localização geográfica das fazendas produtoras de café no município de Patrocínio Minas Gerais.....	76
Tabela 4. Identificação das áreas, de acordo com os sistemas de manejo e variedades de café estabelecidas nas fazendas do município de Patrocínio, Minas Gerais.	79

SUMARY

CAPÍTULO 1	15
FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	15
1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. O café e sua importância.....	17
2.2. Modelo de agricultura convencional.....	18
2.3. Modelo de agricultura regenerativa	19
2.4. O Solo e sua dinâmica ecológica	21
2.5. Indicadores biológicos de qualidade do solo	22
2.6. A atividade enzimática como bioindicador da qualidade do solo.....	23
REFERÊNCIAS	29
CAPÍTULO 2	36
ARTIGO 1: INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO ASOCIADOS COM A PRODUÇÃO DO CAFEEIRO EM AREAS DO DOMINIO MATA ATLANTICA.	36
RESUMO	36
ABSTRACT	37
1. INTRODUÇÃO.....	38
2. MATERIAL E MÉTODOS	39
2.1. Caracterização das áreas experimentais.....	40
2.2. Área de estudo	40
2.3. Amostragem de solo	42
2.4. Análises de atributos físico-químicos do solo	43
2.5. Carbono da biomassa microbiana (CBM)	43
2.6. Respiração basal microbiana (RBM).....	44
2.7. Obtenção do Quociente Metabólico (qCO ₂).....	44

2.8.	Quantificação da atividade da β -glicosidase.....	45
2.9.	Quantificação da atividade da arilsulfatase.....	45
2.10.	Quantificação da atividade de urease	46
2.11.	Determinação da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA)	46
2.12.	Quantificação da atividade da fosfatase ácida.....	47
2.13.	Análises estatísticas.....	47
3.	RESULTADOS	47
3.1.	Atributos físicos e químicos	47
3.2.	Carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana e coeficiente metabólico.....	48
3.3.	Atividade enzimática dos dez talhões de café.....	51
3.4.	Análises de componentes principais dos atributos físicos e químicos nos talhões de café de maior e menor produtividade na estação seca e úmida	56
3.5.	Análises de componentes principais dos indicadores microbiológicos nos talhões de café de maior e menor produtividade na estação seca e úmida	58
4.	DISCUSSÃO.....	59
4.1.	Atributos físicos, químicos, carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana e coeficiente metabólico	59
4.2.	Atividades enzimáticas dos dez talhões de café	62
5.	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS	67
	CAPÍTULO 3	72
	ARTIGO 2: INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO ASSOCIADOS COM OS SISTEMAS DE MANEJO DO CAFEIEIRO EM ÁREAS DO DOMÍNIO CERRADO DE MINAS GERAIS.....	72
	RESUMO	72
	ABSTRACT	73
1.	INTRODUÇÃO	74

2. MATERIAL E METODOS.....	76
2.1. Caracterização da região experimental	76
2.2. Amostragem de solo	77
2.3. Carbono da biomassa microbiana (CBM)	79
2.4. Respiração basal microbiana (RBM).....	80
2.5. Obtenção do Quociente Metabólico (qCO ₂).....	80
2.6. Quantificação da atividade da β -glicosidase.....	80
2.7. Quantificação da atividade da arilsulfatase.....	80
2.8. Quantificação da atividade de urease.....	81
2.9. Determinação da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA).....	81
2.10. Quantificação da atividade da fosfatase ácida.....	82
2.11. Análises de atributos físico-químicos do solo.....	82
2.12 Análises Estatísticas.....	83
3. RESULTADOS	83
3.1. Carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana e coeficiente metabólico.....	83
3.2. Atividades enzimáticas no sistema de manejo de café convencional, regenerativo e floresta nativa.....	86
3.3. Atributos químicos e físicos dos solos sob diferentes sistemas de manejo de café e floresta	91
3.4. Análise de componentes principais (PCA) dos sistemas manejo de café.....	91
4. DISCUSSÃO	93
4.1. Carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana e coeficiente metabólico.....	93
4.2. Atividades enzimáticas	95
4.3. Atributos físico-químicos	98
5. CONCLUSÃO.....	99
REFERENCIAS	100

ANEXOS	106
--------------	-----

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

1. INTRODUÇÃO

A intensificação dos sistemas de produção agrícola é uma tendência crescente em todo o mundo, e o Brasil se destaca como um dos líderes no setor. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) estima-se uma área agrícola com uma extensão de terra superior a 87 milhões de hectares. Na produção de café, o Brasil se posiciona como o principal produtor mundial (ICO, 2023) estimando para a próxima safra uma extensão de 2,25 milhões de hectares e uma produção em torno de 54,74 milhões/sacas/60kg (CONAB, 2022) representando um terço do mercado internacional da commodity.

No Brasil, o estado de Minas Gerais tem liderado como o maior produtor de café arábica do país, abrange aproximadamente 1,08 milhão de hectares, com uma produção estimada de 27.831 mil sacas (CONAB, 2022) o que representa aproximadamente metade da área cultivada e da produção no país. Isso pode ser devido às condições climáticas favoráveis, à aptidão do uso, e às boas características físicas do solo para a mecanização. No entanto, as características químicas desses solos apresentam limitações na sua fertilidade natural, levando aos produtores a fazer uso de insumos externos, como fertilizantes e defensivos para superar essas limitações e manter a produção agrícola além da qualidade o solo (MARTINEZ *et al.*, 2014).

A cafeicultura está estabelecida principalmente nas regiões da Zona da Mata, Sudoeste de Minas e Triângulo Mineiro, apresentando uma forte influência da área delimitada pelo bioma Mata Atlântica, que é um hotspot de diversidade (MYERS *et al.*, 2000). Nessa região, existe uma vasta área reconhecida pela produção de cafés (SOUZA *et al.*, 2012). O mesmo padrão ocorre na área delimitada pelo bioma Cerrado, na parte sul e oeste do estado, que inclui municípios como Araguari e Patrocínio. Essas áreas se destacam pelo seu grau de desenvolvimento tecnológico e produtivo. Contudo, a cafeicultura atua como agente de conversão de habitats nesses ecossistemas (GIANNETTI *et al.*, 2011).

O setor cafeeiro apresenta um grande desafio que é manter uma produção cada vez mais eficiente e com menor impacto ambiental, baseada em uma gestão que garanta a sustentabilidade (TEIXEIRA *et al.*, 2021), com a implementação de práticas de manejo que

promovam a conservação do solo (FAUCON; HOUBEN; LAMBERS, 2017). Neste contexto, é necessária a integração do componente biológico do solo em áreas de café (BASTOS *et al.*, 2023; ROMERO *et al.*, 2023), determinando a qualidade integral do mesmo, e consequentemente apoiar a gestão do agroecossistema (PAZ-FERREIRO; FU, 2013).

Aragão *et al.*, (2020) apresentaram as primeiras evidências sobre a relação entre indicadores microbiológicos de qualidade do solo e produtividade do cafeeiro em condições ambientais e manejo altamente homogêneo. De acordo com os autores, carbono da biomassa microbiana e atividade das enzimas β -glicosidase e Urease foram superiores em lavouras de café de alta produtividade durante a estação seca de 2017, no município de Patrocínio, no Cerrado brasileiro. Os indicadores dos atributos físicos e químicos do solo, não foi evidenciado o mesmo nível de discriminação e da relação dos indicadores microbiológicos com a produtividade.

Considerando que cada região apresenta suas particularidades como tipos de solos, topografia, relevo, microclimas, variedades de café, práticas de manejo, graus de nível tecnológico (GUIMARÃES, *et al.*, 2013; PIMENTEL, *et al.*, 2011), torna-se relevante aprofundar-se sobre a temática para compreender a relação desses indicadores microbiológicos (carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana, quociente metabólico assim como as atividades enzimáticas β -glicosidase, arilsulfatase, urease, hidrólises de diacetato de fluoresceína) e ampliar a base de indicadores incorporando a quantificação da atividade da fosfatase, que permitirão entender as respostas da produtividade e/ou do manejo da cultura do cafeeiro em diferentes áreas com características que incluem uma maior heterogeneas.

Portanto, esse trabalho teve como hipótese que os indicadores microbiológicos de qualidade do solo apresentam a maiores valores nas áreas com maiores produtividade, além de que os maiores valores têm relação com sistemas de manejo mais conservacionistas adotados na cultura do cafeeiro. O objetivo foi avaliar a associação entre indicadores microbiológicos do solo e a produtividade da cultura do café no domínio da Mata Atlântica, no município de Santo Antônio do Amparo e comparar o impacto dos diferentes sistemas de produção de café na qualidade do solo no Município de Patrocínio, no Cerrado brasileiro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O café e sua importância

O setor agrícola mundial na produção de café tem ganhado cada vez mais relevância, como foi evidenciado nos relatórios na produção e exportação dos grãos de café (ICO, 2023). Nas últimas safras, tem-se observado uma tendência positiva de crescimento, mantendo esse padrão por mais de 30 anos com eventuais quedas nesse período (QUINTERO; ROSALES, 2014). No ano cafeeiro 2009/10, fatores climáticos e manifestação epidêmica da ferrugem do cafeeiro limitaram a produção mundial para 125,9 milhões sacas de 60kg, 7% menor do que o ano anterior (FNC, 2009). No ano cafeeiro 2014/15 o clima desfavorável com, a seca nos principais países produtores do continente americano, reduziram a produções para 146,7 milhões sacas de 60kg (ICO, 2023).

No ano cafeeiro 2022/23, a produção mundial de café foi estimada em 171,1 milhões de sacas de 60 kg, representando um aumento de 1,7% em relação ao volume produzido no ano cafeeiro 2021/22. Os três maiores produtores de café a nível mundial são Brasil, Vietnã e Colômbia. Na safra 2022/23 o Brasil e Vietnã registraram um aumento na produção, o Brasil teve uma safra de 54,74 milhões/sacas/60kg e Vietnã de 31,5 milhões de sacas de 60 kg (EMBRAPA, 2022). Já a Colômbia produziu 11,1 milhões de sacas de 60kg, uma queda de 8% em comparação em 2021/22, devido ao excesso de chuvas causado pelo fenômeno La Niña durante os últimos 2 anos (FNC, 2023).

Os números apresentados demonstram uma importante expressão da produção de café em nível global, com diferentes países contribuindo para esse crescimento. Na história recente, o Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo, alcançando uma produção notável de aproximadamente 55,1 milhões de sacas de café beneficiado na safra de 2023, superando o registro da produção de 50,92 milhões de sacas de café beneficiado de 60 kg em 2022, e de 49,58 milhões de sacas de 60 kg beneficiado ano 2021, mas há previsão de ser superada nas safras posteriores (CONAB, 2023).

A cultura do café tem importância não apenas nos aspectos produtivos, mas também em sua função social, histórica e econômica (VAN ASSELT; USECHE, 2022). Além disso, para os produtores é uma fonte significativa de renda e gerador de empregos ao longo de toda a sua cadeia produtiva, envolvendo várias etapas desde plantio, crescimento da cultura, colheita, processamento, comercialização e o transporte. Nessas diversas etapas é necessário a mão de obra qualificada para garantir a eficiência dos sistemas produtivos cafeeiros (MURTHY;

NAIDU, 2012). A pesquisa também desempenha um papel fundamental no aumento da eficiência dos processos, alcançando maior nível tecnológico dos sistemas produtivos cafeeiros.

A cafeicultura brasileira é bem reconhecida pelo alto nível tecnológico, resultado de avanços contínuos em pesquisas voltadas para a incorporação de inovações, incentivando ao setor em adotar tecnologias de avançadas. Uma maneira de contribuir para esses avanços tecnológicos é por meio das pesquisas voltadas aos sistemas de produção de café e em específico a microbiologia do solo sob a cafeicultura (ARAGÃO *et al.*, 2020a). A microbiologia do solo envolve a avaliação de diversos indicadores biológicos de qualidade do solo, como o carbono da biomassa microbiana, a respiração microbiana basal, a razão metabólica, diversidade microbiana, as diversas atividades de enzimas como β -glicosidase, arilsulfatase, urease e fosfatase, e a análise da diacetato de fluoresceína (TÓTOLA; CHAER, 2002). Os indicadores são importantes para avaliar a saúde e a qualidade do solo, sendo um suporte dos diferentes sistemas de manejo que visam a sustentabilidade e produtividade da cultura de café enquanto involucra as diferentes práticas de manejo dependendo do sistema adotado.

2.2. Modelo de agricultura convencional

A agricultura convencional é uma prática que implica a simplificação dos sistemas naturais da terra, sendo as monoculturas a expansão máxima desse processo, criando agroecossistemas que exigem uma constante intervenção humana (ALTIERI, 2009). Na conceptualização da agricultura convencional é necessário a abordagem da revolução verde, ao estar intimamente relacionadas. Revolução verde é, de fato, o ponto de origem e desenvolvimento da agricultura convencional tal como a conhecemos na atualidade. Iniciada nas décadas de 1940 e 1950, a Revolução verde foi um conjunto de iniciativas e inovações tecnológicas introduzidas para aumentar a produção agrícola em resposta ao rápido crescimento populacional e à necessidade de melhorar a segurança alimentar global (OCTAVIANO, 2010). Da emergência da implementação de tecnologias foram destacadas seis práticas básicas, cultivo intensivo do solo, monocultura, irrigação, aplicação de fertilizante inorgânico, controle químico de pragas e manipulação genética de plantas cultivadas sendo as bases da agricultura moderna (DUTRA; DE SOUZA, 2017).

Esse movimento da revolução verde toma maior relevância pela modernização das práticas agrícolas. No entanto, apesar de seus avanços na produtividade, é inegável que o modelo gerou uma série de impactos sociais e agrícolas positivos iniciais, virando para o que é

denominado sistema de produção convencional agrícola, referindo-se a métodos agrícolas que utilizam insumos químicos sintéticos, como fertilizantes, pesticidas e herbicidas, para maximizar a produtividade das culturas (PENTEADO, 2001).

A agricultura convencional no Brasil é amplamente praticada, visando sempre no aumento da eficiência no uso dos recursos e os rendimentos das diferentes cultivares. Geralmente esses sistemas convencionais incluem aplicações frequentes de fertilizantes químicos sintéticos, fungicidas, inseticidas, herbicidas, cultivares de alto rendimento, maquinário pesado, cultivo intensivo e irrigação (LE CAMPION *et al.*, 2020). Embora seja amplamente adotado, o sistema convencional tem sido criticado por seus impactos ambientais negativos, incluindo a degradação da estrutura do solo, lixiviação de nitrato e poluição das águas subterrâneas, bem como níveis reduzidos de N total do solo e C total do solo ao longo do tempo, além da redução da biodiversidade (ALTIERI, 2009; POUDEL *et al.*, 2002).

Por exemplo, a poluição ambiental e os efeitos negativos à saúde dos agricultores e habitantes do entorno por meio do uso excessivo de pesticidas químicos são as principais dificuldades na produção brasileira de café (BODDEY *et al.*, 2003; LOPES; ALBUQUERQUE, 2018). Além disso, o uso contínuo de insumos químicos pode levar à resistência de pragas e doenças, exigindo doses cada vez maiores de pesticidas, o que intensifica os problemas ambientais e de saúde pública associados (ALTIERI, 2001).

No entanto, há uma tendência crescente em direção à substituição desse sistema por práticas de manejo mais sustentáveis. Sistemas agrícolas alternativos que diferem em termos de níveis de insumo, como orgânico, manejo integrado de pragas (redução do uso de pesticidas), sistemas agrícolas de baixo insumo (diminuição da aplicação de fertilizantes sintéticos e pesticidas), agricultura de conservação (redução do preparo do solo, culturas de cobertura e rotação de culturas melhorada), e a agricultura regenerativa, que integra abordagens agrícolas voltadas para a conservação e restauração de paisagens degradadas, é proposta como uma solução potencial para promover a saúde do solo, a sustentabilidade agrícola e a melhoria da qualidade ambiental. (FRANCIS, 1985; LE CAMPION *et al.*, 2020; MASSY, 2024; POUDEL *et al.*, 2002).

2.3. Modelo de agricultura regenerativa

Em meados do século passado, os rendimentos agrícolas em sistemas tradicionais tinham dependência principalmente dos recursos internos das propriedades, do reaproveitamento de subprodutos, controle biológico endêmico e dos padrões de precipitações. Essa agricultura também se baseava no cultivo de diversas culturas ou variedades em diferentes espaços e tempos, como pratica predominante para a proteção contra pragas ou condições climáticas adversas (ALTIERI, 2001), além de integrar a produção agrícola e pecuária.

Nesse contexto, a conexão entre agricultura e ecologia era bastante forte, e sinais de degradação ambiental não eram observados, até a inclusão das práticas do modelo convencional (LIMA, 2009). Porém a agricultura tradicional também mudou para um sistema de maior nível tecnológico, parte denominado sistema orgânico, que apresentava como princípio o uso de insumos de caráter naturais e proibindo produtos químicos sintéticos e organismos modificados geneticamente (MATTEI; MICHELLON, 2021; RIBEIRO; MARIN, 2012). Nesse contexto, promove práticas como a rotação de culturas, o uso de adubos orgânicos, e o tratamento ético dos animais, visando fechar ciclos de nutrientes e conservar recursos naturais. Além de proteger o meio ambiente, busca ser economicamente viável e socialmente justa, fortalecendo comunidades rurais e promovendo a transparência por meio da certificação e educação contínua sobre práticas sustentáveis (SANTOS *et al.*, 1981).

Posterior à consolidação do modelo de produção orgânico, este toma grandes proporções focando-se somente na eliminação de insumos químicos sintéticos, e acabou perdendo algumas características conservacionistas. Frente a isso, na década de 1980, a agricultura regenerativa surgiu como uma abordagem holística para resgatar e aprimorar os princípios do início da agricultura orgânica da década de 1940.

A agricultura regenerativa tem sua base na agricultura orgânica, mas prioriza a restauração da saúde do solo por meio gestão de práticas no uso da terra de menor impacto ambiental, aumentando a matéria orgânica e o que faz do modelo ser integral com uma abordagem agrícola que visa restaurar e revitalizar os ecossistemas agrícolas, aumentando a capacidade de autorrenovação e resiliência, contribuindo para a saúde do solo, a percolação e retenção de água, a conservação da biodiversidade e o sequestro de carbono (KESHAVARZ; SHARAFI, 2023; ELEVITCH; MAZAROLI; RAGONE, 2018). A agricultura regenerativa na pratica de caráter holístico integra os processos naturais, além de promover a conservação das condições dos agroecossistemas, e contribuir para a regeneração dos recursos naturais para alcançar a sustentabilidade.

O termo "agricultura regenerativa" foi cunhado em 1983, sob argumento de que práticas agrícolas apenas mantêm os recursos naturais, sendo necessário adotar abordagens que realmente regenerem e melhorem esses recursos ao longo do tempo (HERMANS *et al.*, 2023). Estabelece uma série de princípios fundamentais que incluem, saúde do solo com foco na construção e manutenção da fertilidade do solo, aumentando a matéria orgânica e promovendo a vida microbiana, uso de práticas de policultura e rotação de culturas para aumentar a biodiversidade e reduzir a dependência de insumos externos, utilizando o pastoreio rotacional para melhorar a fertilidade do solo e a biodiversidade. Minimização do distúrbio do solo, preservando sua estrutura e microrganismos. Ciclagem de nutrientes, maximização do uso eficiente dos nutrientes através de compostagem, cobertura vegetal e reciclagem de resíduos orgânicos. Sequestro de carbono, implementação de práticas que aumentem o armazenamento de carbono no solo, ajudando a mitigar as mudanças climáticas.

A agricultura regenerativa tem como objetivo final construir um agroecossistema saudável, ou seja, criar um ecossistema resiliente que permite o fornecimento de serviços ecossistêmicos, como os serviços de regulação, habitat e de suporte (GOSNELL *et al.*, 2022), focando-se na melhoria do sistema alimentar: melhorar a saúde do solo, otimizar a gestão de recursos, aliviar as mudanças climáticas e melhorar a qualidade e a disponibilidade da água (SCHREEFEL *et al.*, 2020).

2.4. O Solo e sua dinâmica ecológica

O solo é um recurso natural essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres, integrando aspectos físicos, químicos e biológicos. Ele é composto por minerais inorgânicos, partículas de areia, silte e argila, matéria orgânica estabilizada pela decomposição de organismos vivos, e uma rica diversidade biótica, incluindo minhocas, insetos, bactérias, fungos, algas e nematóides, além de gases como O₂, CO₂ e N₂ (DORAN; PARKIN, 1994; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Esses autores destacam que o solo, como um sistema dinâmico e vital, regula a produção de alimentos e fibras, o equilíbrio global dos ecossistemas e oferece suporte físico e recursos essenciais para o crescimento das plantas.

O solo também desempenha papel crucial na regulação hídrica e na decomposição de poluentes. Suas seis funções principais, segundo Blum e Santelises (1994), incluem produção de biomassa, filtração e proteção ambiental, e habitat biológico; e três voltadas às atividades humanas. Sua proteção e manejo sustentável são fundamentais para a manutenção dos

equilíbrios ecológicos e da produtividade, o que redundará na condição da qualidade do solo, esta refere-se à sua habilidade de desempenhar funções críticas no ecossistema, incluindo sustentar a produtividade biológica, conservar a qualidade ambiental e promover a saúde de plantas e animais (DORAN; PARKIN, 1994).

No contexto agrícola, o solo fornece suporte às plantas, regula o fluxo hídrico e age como um tampão para mitigar poluentes químicos (LARSON; PIERCE, 1994). Sua proteção e manejo sustentável são importantes para a manutenção dos equilíbrios ecológicos e a produtividade. Portanto, a validação da qualidade de solo por meio dos atributos físicos, químicos, microbiológicos é fundamental no entendimento holístico do sistema dentro das complexas interações presentes no ecossistema (ARAGÃO *et al.*, 2020a; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Nesse contexto, incluir bioindicadores como uma ferramenta útil para monitorar e prever mudanças ou alterações na qualidade do solo é imperante devido à sua alta sensibilidade e elevado potencial de diagnóstico nos sistemas de manejo dos cultivos (Tabela 1).

2.5. Indicadores biológicos de qualidade do solo

Entre os indicadores biológicos mais utilizados para inferir sobre a qualidade do solo, destacam-se a biomassa microbiana, a respiração microbiana do solo, o quociente metabólico (ANDERSON; DOMSCH, 1993; BROOKES *et al.*, 1985; GIANFREDI; RUGGIERO, 2006; VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987) e as atividades enzimáticas (Tabela 1). Esses indicadores têm demonstrado ser altamente responsivos (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996) a qualquer alteração ou perturbação, tornando-se ferramentas imprescindíveis na avaliação e monitoramento da qualidade dos solos, dada a sensibilidade que apresentam.

Na (Tabela 1) são apresentados os diferentes trabalhos de pesquisa na cultura do cafeeiro, que priorizam o uso de diferentes indicadores microbiológicos, sob diversas condições agroecológicas no Brasil e em outros países produtores de café. Inicialmente foram priorizados o uso de indicadores como CBM, RBM e qCO₂ nas avaliações sobre os impactos de diferentes práticas e usos do solo (ALVES *et al.*, 2011), concomitantemente incluídas na avaliação da qualidade do solo na cultura do cafeeiro, como apresentou Theodoro *et al.*, (2003) avaliação da qualidade do solo sob mata nativa e agroecossistemas cafeeiros. Esses indicadores exibiram informação para o entendimento do solo e dos processos bioquímicos fundamentais na ciclagem

de nutrientes e disponibilidade para as plantas de importância agrícola (ČAPEK, CHOMA, *et al.*, 2023; VANCE, BROOKES, *et al.*, 1987).

Nessa dinâmica de gerar maior entendimento do uso e manejo do solo, na cultura do cafeeiro, as propostas de pesquisa de acordo a (Tabela 1). Melloni *et al.*, (2013) e Naves *et al.*, (2020) e Zaidan *et al.*, (2023). Avaliando o efeito do uso de diferentes doses de herbicida no manejo da cultura, o uso crescente de doses de gesso e manejo de plantas daninhas, determinaram o efeito das práticas na qualidade do solo, determinado a partir da avaliação dos bioindicadores CBM, RBM e qCO_2 , mas nas condições específicas (Tabela 1). Da mesma forma, Junior *et al.*, (2017) e Paolini, (2018) ao avaliar o efeito da agricultura orgânica e convencional do café nas propriedades bioquímicas do solo, identificaram a CBM e RBM se correlacionam e contribuem para diferenciar esses sistemas de manejo. (Tabela 1).

Assim mesmo, Zaidan *et al.*, (2023) validaram o impacto de estratégias de manejo de plantas daninhas, usando CBM e RBM como indicadores microbiológicos, destacam a correlação positiva entre esses indicadores e a produtividade de grãos de café, indicando que o manejo que promovem a cobertura do solo favorecem a manutenção da qualidade do solo e a sustentabilidade do sistema, comportamento similar foi descrito nas condições do Cerrado, por Aragão *et al.*, (2020a) na avaliação de indicadores microbiológicos de qualidade do solo ao relacionar os CBM, com as maiores produtividade e qCO_2 , com as áreas de menor produtividade, na cultura do cafeeiro (Tabela 1). Não apenas, na cultura de café, Peña *et al.*, (2005) observaram um gradiente de produção de CO_2 na respiração na floresta entre as camadas do solo sendo as, mas externas com maior quantidade e qualidade de compostos orgânicos, adequado para a maior atividade microbiana, estimulando o crescimento dos microrganismos característico da a qualidade do solo em áreas de mata nativa.

2.6. A atividade enzimática como bioindicador da qualidade do solo

Além dos bioindicadores CBM, sua atividade RBM e o quociente metabólico (qCO_2), as atividades enzimáticas, sensíveis às mudanças ambientais, são excelentes indicadores de qualidade do solo (ARAGÃO *et al.*, 2020a). Elas refletem as atividades no ambiente edáfico e são amplamente utilizadas na avaliação de solos e na cultura do cafeeiro (Tabela 1). A β -glicosidase (β -gli) destaca-se como indicadora da qualidade do solo, ao participar da degradação de resíduos orgânicos e discrimina diferentes tipos de manejo agrícola (LISBOA *et*

al., 2012; VANEGAS; ZAMBRANO; AVELLANEDA-TORRES, 2018), além de sistemas agroflorestais e vegetação nativa (MAGRO; MAZZUCHELLI; ALVES, 2022). A arilsulfatase (Aril) hidrolisa ésteres de sulfato em diversos solos (GUPTA; FARRELL; GERMIDA, 1993). A urease converte nitrogênio em amônia e ácido carbônico (KRAJEWSKA, 2009; PACHECO; COLLA, 2019). A fosfatase ácida (Fosf) catalisa a hidrólise de ésteres de ácido fosfórico, liberando fosfato. Por fim, a hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) envolve a catálise por lipases, proteases e esterases, refletindo a atividade enzimática global do solo (CHÁVEZ *et al.*, 2011), todas essenciais para a dinâmica da ciclagem de nutrientes.

Alguns autores destacam a importância dos indicadores microbiológicos, especificamente as atividades enzimáticas, β -gli, Aril, Ur, Fosf e FDA, para compreender as respostas do cafeeiro em diferentes sistemas de produção (ARAGÃO *et al.*, 2020b; BASTOS *et al.*, 2023; NAVES *et al.*, 2020; RIGAL; XU; VAAST, 2020) (Tabela 1). Durante a análise dos efeitos do cultivo de café na qualidade do solo, incluindo regimes hídricos, calagem e consórcio, as atividades enzimáticas (β -gli, Aril e Fosf) possibilitaram estabelecer relações de causa e efeito. O consórcio na cultura do café apresentou maior impacto sobre as atividades enzimáticas, com destaque para a arilsulfatase e a urease durante a estação úmida, conforme apontado por Rodrigues *et al.*, (2021) e Núñez *et al.*, (2012) (Tabela 1), influenciado pelo manejo e pelas condições edáficas. Na Colômbia, práticas de manejo convencionais reduziram a atividade da urease devido à presença do produto final da reação (VANEGAS; ZAMBRANO; AVELLANEDA-TORRES, 2018).

Em síntese, esses indicadores são ferramentas úteis para monitorar a qualidade do solo e as atividades agrícolas, refletem a atividade dos microrganismos associados às funções vitais do solo. Além de ser amplamente usados em índices como o SMAF para avaliar os impactos das mudanças no uso da terra (ANDREWS; KARLEN; CAMBARDELLA, 2004). Estudos, como os de Amorim *et al.*, (2020), os algoritmos do SMAF fornecem resultados confiáveis e contribuem para melhores práticas de gestão agrícola. O BioAS, por sua vez, exemplifica a aplicação dessa tecnologia, alinhando-se às descobertas de Mendes *et al.*, (2021), a quantificação das enzimas β -gli e Aril indispensáveis para a validação da qualidade do solo, assim, aprimorar o manejo do solo no Cerrado Mineiro.

Tabela 1. Consolidado de pesquisas.

Que incluem a uso de bioindicadores carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana, quociente metabólico, atividades enzimáticas β -glicosidase, arilsulfatase, urease, fosfatase, hidrolises de diacetato de fluoresceína, para avaliar a qualidade do solo e relação com a produtividade e sistemas de manejo na cultura do cafeeiro.

DOI	Autores	Título	Local	CMB	RBM	qCO ₂	β -gli	Aril	Fosf	FDA	Ur	Produtividade
				$\frac{g\ C\ Kg^{-1}}{\mu g\ C\ g^{-1}\ solo\ seco}$	$\frac{\mu g\ CO_2\ g^{-1}\ solo}{seco\ dia^{-1}}$	$\frac{mg\ C-CO_2}{kg^{-1}}$	$\frac{\mu g\ p-nitrofenol\ g^{-1}\ solo}{seco\ h^{-1}}$				$\frac{\mu g\ N-NH_4}{g^{-1}\ solo\ seco\ h^{-1}}$	K ou Sc
https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107270	Tatiana Reis dos Santos Bastos, Patrícia Anjos Bittencourt Barreto Garcia, Ieda de Carvalho Mendes, Paulo Henrique Marques Monroe, Flávia Ferreira de Carvalho.	Resposta da biomassa microbiana do solo e atividade enzimática em sistemas agroflorestais à base de café em uma região de clima tropical de alta altitude do Brasil	Barra do Choça no território do Planalto da Conquista, Nordeste de Brasil.	187,6	79,3		95	134				
https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108589	Abraham de Jesús Romero Fernández, María del Carmen Ángeles González-Chávez, Bráulio Edgar Herrera Cabrera, Jesús Eulises Corona Sánchez, Rogelio Carrillo González.	A associação café-manga promove condições de solo favoráveis para plantas mais bem nutridas e de maior rendimento	Emiliano Zapata, Veracruz, Mexico.	1147								1500k
https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100007	Rogério Melloni, Gabriela Belleze, Arthur Manuel Silva Pinto, Luiza Barbosa de Paula Dias, Emilienne Margueritte Silve, Eliane Guimarães Pereira Melloni, Maria Inês Nogueira Alvarenga, Elifás Nunes de Alcântara	Métodos de controle de plantas daninhas e seus impactos na qualidade microbiana de solo sob cafeeiro	São Sebastião do Paraíso, MG, Brasil	33,3	128	4,4				0,085		

https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107171	Heitor Mancini Teixeira, Felix Bianchi, Irene Maria Cardoso, Pablo Tittone, Marielos Peña-Claros	Impacto do manejo agroecológico na diversidade vegetal e nos serviços ecossistêmicos baseados no solo em sistemas de pastagens e cafeeiros na Mata Atlântica do Brasil	Minas Gerais, Brasil.	319,3								2144k
https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000500013	Márcio Sampaio Pimentel, Helvécio De-Polli, Adriana Maria de Aquino.	Bioindicadores de qualidade do solo em sistemas de cultivo orgânico de café	Rio de Janeiro, Brasil	111,1	1,09	11,53						
https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106205	Osner Obede da Silva Aragão, Sílvia Maria de Oliveira Longatti, Polyana Santos de Castro, Márcia Rufini, Gladyston Rodrigues Carvalho, Teotônio Soares de Carvalho, Fátima Maria de Souza Moreira.	Indicadores microbiológicos da qualidade do solo estão relacionados com maiores produtividades de café na região do Cerrado brasileiro	Minas Gerais, Brasil	356	59	0,19	78	108		257	28	20,3 sc
				518	64	0,13	45	62		164	26	17,1 sc
				289	302	1,22	60	45		236	20	15 sc
				292	325	0,94	37	32		277	14	9,37 sc
10.1590/1983-40632018v4852373	Johana Juliet Caballero Vanegas, Karen Bibiana Mejía Zambrano, Lizeth Manuela Avellaneda-Torres	Efeito do manejo ecológico e convencional sobre Atividades enzimáticas do solo em agroecossistemas cafeeiros	Colômbia, Cundinamarca.				492		783		16,37	
https://doi.org/10.1007/s42729-023-01208-4	Alefsi David SánchezReinoso, Edgar Álvaro ÁvilaPedraza, Leonardo Lombardini, Hermann Restrepo	A aplicação do Biochar de polpa de café melhora as características físicas, químicas e biológicas do solo para o cultivo do café	Chaparral, Tolima, Colômbia.		188							
10.25186/v15i.1756	Andrêssa de Paula Naves, Aline Oliveira Silva, Marisângela Viana Barbosa, Flávio Araújo Pinto, Jessé Valentim dos Santos, Orivaldo José Saggin Junior, Paulo Tácito Gontijo Guimarães, Marco Aurélio Carbone Carneiro	Comportamento dos atributos bioquímicos de um Latossolo submetido a altas doses de gesso na cultura do café	São Francisco, MG, Brasil	625	5,78	9,29			1269	294	8,78	60sc
				682	7,05	11,97			2551	321	11,9	60sc
10.1590/0103-8478cr20200532	Raquel Nogueira Rodrigues, Fábio Bueno dos Reis Junior, André Alves de Castro Lopes. Omar Cruz Rocha3 Antônio Fernando Guerra3 Adriano Delly Veiga1	Atividade enzimática do solo sob cultivo de café com diferentes regimes hídricos	Planaltina, DF, Brasil				140	106	628			
							146	113	618			

	Ieda de Carvalho Mendes ¹												
https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257	Jorge E. Paolini Gómez ¹	Atividade microbiológica e biomassa microbiana em solos cafeeiros dos Andes venezuelanos	Mérida, Venezuela	463	55,1	5,3							
				246	51,2	9,6							
https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346128	Romildo Rocha Azevedo Junior, Janaina Biral dos Santos, Dilmir Baretta, Alessandro Coutinho Ramos, Arthur Prudêncio de Araujo Pereira & Elke Jurandy Bran Nogueira Cardoso	Propriedades químicas e microbiológicas do solo em sistemas manejo orgânico e convencional de Coffea arabica L	Espírito Santo, Brasil	0,46	0,03	2,97							
				0,37	0,04	4,17							
http://dx.doi.org/10.19084/RCA16041	Nathalia de F. Guimarães, Anderson de S. Gallo, Anastácia Fontanetti, Silvana P. Meneghin, Maicon DB de Souza, Kátia PG Morinigo e Rogério F. da Silva	Biomasa y atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro	São Paulo, Brasil	359,6	20,6	29,87							
https://doi.org/10.1080/00103624.2012.648470	Fábio Luiz Partelli, Henrique Duarte Vieira, Enderson Petrônio de Brito Ferreira, Alexandre Pio Viana, Marco Antonio Martins & Segundo Urquiaga	Características químicas e microbiológicas do solo. em Café Convencional e Orgânico	Espírito Santo, Brasil	147	8,7	1,17				146			
				73,3	8,33	2,33				161			
https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500010	Elcio Liborio Balota e Julio César Dias Chaves	Atividade enzimática e mineralização de Carbono e nitrogênio em solo cultivado Com café e fertilizantes verdes	Paraná, Brasil.					11	333		73		
https://doi.org/10.1007/s11104-019-04004-1	Clément Rigal, Jianchu Xu & Philippe Vaast	Árvores jovens de sombra melhoram a qualidade do solo em sistemas de café de manejo intensivo recentemente convertidos em sistemas agroflorestais na província de Yunnan, China	Yunnan, sudoeste de China				36		66,6				
							63		44,3				
https://link.springer.com/article/10.1007/s42770-024-01279-0	Elismar Pereira de Oliveira, Anny Karoline Rocha Quirino Martins, Silva Maria de Oliveira Longatti,	Atributos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo em sistemas de cultivo de café no	Bahia, Brasil	178,6	19,8	0,11			292,5	244,4	8,65		
				219	38,2	0,17			434,9	263,3	6,28		

	Osnar Obede da Silva Aragão, Leandro Martins de Freitas, Alexandra Damascena Santos, Fatima Maria de Souza Moreira, Divino Levi Miguel, Patrícia Lopes Leal	sudoeste da Bahia, Brasil		308,9	10,9	0,04			278,2	317,6	22,35	
				327,8	74,4	0,23			328,5	272,8	6,51	
https://doi.org/10.4025/actasciagron.v25i1.2468	Theodoro, Vanessa Cristina de Almeida Alvarenga, Maria Inês Nogueira Guimarães, Rubens José Mourão Júnior, Moisés	Carbono da biomassa microbiana e micorriza em solo sob mata nativa e agroecossistemas cafeeiros	Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, Brasil.	585								
				207,8								

Fonte: Autor.

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, Miguel. Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios. *Agroecología: El camino hacia una Agricultura Sustentable*, [S. l.], p. 27–34, 2001.
- ALTIERI, Miguel. La agroecología Frente a La Crisis Alimentaria Global. Quito: Letras Verdes. **Revista Latinoamericana De Estudios Socioambientales**, [S. l.], 3-4p. 2009
- ALVES, T. d S. et al. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum - Agronomy**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 341–347, 2011.
- AMORIM, Helen C. S. et al. Soil quality indices based on long-term conservation cropping systems management. **Agrosystems, Geosciences and Environment**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 1–13, 2020.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. 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**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. et al. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 68, n. 6, p. 1945–1962, 2004.
- ARAGÃO, O. O. d S. et al. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 113, p. 106205, 2020. a
- ARAGÃO, O. O. d S. et al. The Effectiveness of a Microbiological Attribute as a Soil Quality Indicator Depends on the Storage Time of the Sample. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [S. l.], 2020.b.
- AVELLANEDA-TORRES, L. M. et al. Actividades Enzimáticas en Consorcios Bacterianos de Suelos Bajo Cultivo de Papa con Manejo Convencional y Bajo Pastizal. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* [S. l.], v. 65, n. 26, p. 6349–6360, 2012.
- BALOTA, E. L.; CHAVES, J. C. D. Enzymatic activity and mineralization of carbon and nitrogen in soil cultivated with coffee and green manures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 1573–1583, 2010.
- BASTOS, R. dos S. T. et al. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **CATENA**, [S. l.], v. 230, p. 107270, 2023.
- BLUM, W. E. H.; SANTELISES, A. A. A concept of sustainability and resilience based in soil functions. In: GREENLAND, D. J.; SZABOLCS, I. (Org.) **Soil resilience and sustainable land use**. Wallingford: CAB, 1994. p. 535-542.

BODDEY, Robert M. Brazilian Agriculture: The Transition to Sustainability. **Journal of Crop Production**, [S. l.], v. 9, n. 1–2, p. 593–621, 2003.

BROOKES, P. C. et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 17, n. 6, p. 837–842, 1985.

ČAPEK, P. et al. Revisiting soil microbial biomass: Considering changes in composition with growth rate. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 184, p. 109103, 2023.

CHÁVEZ, L. F. et al. Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1254–1261, out. 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira. Boletim da Safra 2021, [S. l.], v. 9, n. Terceiro levantamento, p. 60, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO 2o Levantamento de Café - Safra 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe/item/20652-2-levantamento-de-cafe-safra-2023>.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. **In: Methods for Assessing Soil Quality**. [s.l.]: 1996. p. 247–271.

DORAN, John W; Parkin T. B. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. **Soil Science Society of America**, [S. l.], v. 35, n. SSSA Special Publication, p. 3–21, 1994

DUTRA, M. S. R.; DE SOUZA, M. M. O. Cerrado, revolução verde e evolução do consumo de agrotóxicos. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 473–488, 2017.

ELEVITCH, Craig R.; MAZAROLI, Niki D.; RAGONE, Diane. Agroforestry standards for regenerative agriculture. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 10, n. 9, p. 1–21, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/71179090/producao-de-cafe-robusta-do-vietna-atinge-30-milhoes-de-sacas-que-correspondem-a-385-da-safra-mundial-dessa-especie>-Portal Embrapa. 2022.

FAUCON, M. P.; HOUBEN, D.; LAMBERS, H. Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services. **Trends in Plant Science**, [S. l.], v. 22, n. 5, p. 385–394, 2017.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2010. [S. l.], p. 1–56, 2009.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Producción anual de café. Disponível em: <https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-anual-de-cafe-de-colombia-cierra-2022-en-111-millones-de-sacos/> Portal-2022

FRANCIS, Charles A. Rationality of new technology for small farmers in the tropics. **Agriculture and Human Values**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 54–59, 1985.

GIANFREDA, L.; RUGGIERO, P. Enzyme activities in soil. In: Soil biology Nucleic acids and proteins in soil. 8. ed. [s.l.] : **Springer-Verlag: Berlin Heidelberg**, 2006. v. 8p. 257–311.

GIANNETTI, B. F. et al. Emergy assessment of a coffee farm in Brazilian Cerrado considering in a broad form the environmental services, negative externalities and fair price. **Agricultural Systems**, [S. l.], v. 104, n. 9, p. 679–688, 2011.

GOSNELL, Hannah. Regenerating soil, regenerating soul: an integral approach to understanding agricultural transformation. **Sustainability Science**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 603–620, 2022.

GUIMARÃES, G. P. et al. Avaliação da qualidade do solo e de cafeeiros em propriedade familiar do Território do Caparaó-ES Caparaó-ES. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 236–246, 2013.

GUPTA, V. V. S. R.; FARRELL, R. E.; GERMIDA, J. J. Activity of arylsulfatase in Saskatchewan soils. **Can. J. Soil Sc** [S. l.], v. 347, n. April, p. 341–347, 1993.

HERMANS, S. M. et al. The soil microbiome: An essential, but neglected, component of regenerative agroecosystems. **iScience**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 106028, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?edicao=36203>. 2023.

JUNIOR, R. R. A. et al. Chemical and microbiological soil properties in organic and conventional management systems of Coffea arabica L. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 40, n. 14, p. 2076–2086, 2017.

KESHAVARZ, M.; SHARAFI, H. Scaling up climate-smart regenerative agriculture for the restoration of degraded agroecosystems in developing countries. **Sustainable Production and Consumption**, [S. l.], v. 38, p. 159–173, 2023.

KRAJEWSKA, B. Enzymatic Ureases I. Functional, catalytic and kinetic properties: A review. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, [S. l.], v. 59, p. 9–21, 2009.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Org.) Defining soil quality for a sustainable environment. **Madison**: SSSA, 1994. p. 37-51.

LE CAMPION, Antonin et al. Conventional versus organic farming systems: dissecting

comparisons to improve cereal organic breeding strategies. **Organic Agriculture**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 63–74, 2020.

LIMA, G. F. C. Educação ambiental crítica: Do socioambientalismo às sociedades sustentáveis. **Educação e Pesquisa**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 145–163, 2009

LISBOA, B. B. et al. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 33–44, jan. 2012.

LOPES, Carla Vanessa Alves; ALBUQUERQUE, Guilherme Souza Cavalcanti De. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde em Debate**, [S. l.], v. 42, n. 117, p. 518–534, 2018.

MAGRO, L. A. C. et al. Atividade enzimática em solos arenosos manejados com SAF no pontal do Paranapanema. **Colloquium Exactarum**. ISSN: 2178-8332, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 193–200, 2023.

MARTINEZ, H. E. P. et al. Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. **Revista Ceres**, [S. l.], v. 61, p. 838–848, 2014.

MASSY, Charles. Regenerative agriculture: Confronting industrial agriculture with farmer-led sustainability innovation. *Innovation Pathways to Sustainability: Conversations Towards Complex Systems of Governance*, [S. l.], p. 218–227, 2024.

MATTEI, T. F; MICHELLON, E. Overview of organic agriculture and pesticides in Brazil: an analysis from the 2006 and 2017 censuses. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [S. l.], v. 59, n. 4, p. 1–23, 2021.

MELLONI, R. et al. Métodos de controle de plantas daninhas e seus impactos na qualidade microbiana de solo sob cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 37, n. 1, p. 66–75, 2013.

MENDES, I. C. et al. Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. **Documentos Embrapa**, [S. l.], v. 369, p. 1–50, 2021.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. **Editora UFLA**, [S. l.], p. 407–447, 2006.

MURTHY, P. S.; MADHAVA NAIDU, M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, [S. l.], v. 66, p. 45–58, 2012.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature** 2000 403:6772, [S. l.], v. 403, n. 6772, p. 853–858, 2000.

NAVES, A. P. et al. Biochemical parameters of an oxisol submitted to high doses of gypsum in the coffee culture. **Coffee Science**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 1–9, 2020.

NÚÑEZ, A. P. R. et al. Biomasa microbiana y actividad ureasa del suelo en una pradera permanente pastoreada de Chile. **Ciencia del suelo**, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 187–199, 2012.

OCTAVIANO, C. Muito além da tecnologia: os impactos da Revolução Verde. **ComCiência**, [S. l.], n. 120, p. 0–0, 2010.

International Coffee Organization - Trade Statistics Tables. 2021. Disponível em: https://www.ico.org/trade_statistics.asp.

Organización Internacional del Café - Datos históricos. 2023. Disponível em: https://www.ico.org/es/new_historical_c.asp.

PACHECO, V. L.; COLLA, L. M. A enzima urease e suas aplicações na agricultura e engenharia. **Revista CIATEC –UPF**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 1–21, 2019.

PAOLINI, Jorge Emilio Gomez. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. **Revista Terra Latinoamericana**, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 13, 2018. DOI: 10.28940/terra.v36i1.257.

PAZ-FERREIRO, J.; FU, S. Biological Indices for Soil Quality Evaluation: Perspectives and Limitations. **Land Degradation & Development**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 14–25, 2013.

PEÑA, M. et al. Respiração microbiana como indicador da qualidade do solo em ecossistema florestal. **Atlantic**, [S. l.], p. 117–127, 2005.

PENTEADO, S. R. Agricultura Orgânica. **Journal of Chemical Information and Modeling**, [S. l.], p. 41, 2001.

PEREIRA, Elismar de Oliveira et al. Microbiological attributes as indicators of soil quality in coffee growing systems in Southwest Bahia, Brazil. **Brazilian Journal of Microbiology**, [S. l.], v. 55, n. 2, p. 1841–1852, 2024

PIMENTEL, M S. et al. Bioindicators of soil quality in coffee organic cultivation systems. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [S. l.], v. 46, n. 5, p. 545–552, 2011.

POUDEL, D. D. et al. Impacts of cropping systems on soil nitrogen storage and loss. **Agricultural Systems**, [S. l.], v. 68, n. 3, p. 253–268, 2001.

QUINTERO, M. L. R.; ROSALES, M. El mercado mundial del café: tendencias recientes, estructura y estrategias de competitividad. **Visión Gerencial**, [S. l.], n. 2, p. 291–307, 2014.

RIBEIRO, I. G.; MARIN, V. A. The lack of information on genetically modified organisms in Brazil. **Ciencia & saude coletiva**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 359–68, 2012.

RIGAL, C.; XU, J.; VAAST, P. Young shade trees improve soil quality in intensively managed coffee systems recently converted to agroforestry in Yunnan Province, China. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 453, n. 1–2, p. 119–137, 2020.

RODRIGUES, R N. et al. Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria. **Ciencia Rural**, [S. l.], v. 52, n. 3, p. 1–12, 2021.

ROMERO, F. A. J. et al. The coffee-mango association promotes favorable soil conditions for better-nourished and higher-yielding plants. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S. l.], v. 354, p. 108589, 2023.

SÁNCHEZ, Reinoso Alefsi David. et al. The Application of Coffee Pulp Biochar Improves the Physical, Chemical, and Biological Characteristics of Soil for Coffee Cultivation. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 2512–2524, 2023

SANTOS, J. O. et al. Agricultura orgânica e a sustentabilidade. **Journal Article**, [S. l.], v. 2012, p. 59–65, 1981.

SCHREEFEL, L. et al. Regenerative agriculture – the soil is the base. **Global Food Security**, [S. l.], v. 26, n. March, 2020

SOUZA, H. N. D. et al. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 146, n. 1, p. 179–196, 2012.

TEIXEIRA, H. M. et al. Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S. l.], v. 305, p. 107171, 2021.

THEODORO, Vanessa Cristina de Almeida et al. Carbono da biomassa microbiana e micorriza em solo sob mata nativa e agroecossistemas cafeeiros. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 147–153, 2003.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo. **Tópicos em ciência do solo**, [S. l.], n. 2, p. 195–276, 2002.

VAN ASSELT, J.; USECHE, P. Agricultural commercialization and nutrition; evidence from smallholder coffee farmers. **World Development**, [S. l.], v. 159, p. 106021, 2022.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

VANEGAS, J. J. C.; ZAMBRANO, K. B. M.; AVELLANEDA, T. L. M. Effect of ecological and conventional managements on soil enzymatic activities in coffee agroecosystems. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, [S. l.], v. 48, n. 4, p. 420–428, 2018.

ZAIDAN, Ú. Et al. Soil microbiological indicators in Coffea arabica crops under different weed management strategies. **Phytoparasitica**, [S. l.], p. 1–19, 2023.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 1: INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO ASOCIADOS COM A PRODUÇÃO DO CAFEEIRO EM AREAS DO DOMINIO MATA ATLANTICA.

RESUMO

O sistema de produção de café representa importância econômica e social tanto no Brasil quanto em Minas Gerais, e enfrenta um desafio ao buscar maior eficiência na produção, sendo a qualidade do solo um fator importante para manter e suportar essas produções. Nesse sentido, os indicadores microbiológicos surgem como uma ferramenta para monitorar e prever mudanças na qualidade do solo para permitir ajustes nas práticas produtivas, resultando em solos mais saudáveis e maior produtividade. Sendo assim, o objetivo foi avaliar a associação entre indicadores microbiológicos do solo e produtividade da cultura do café no domínio Mata Atlântica, no estado de Minas Gerais, com destaque da inclusão de condições de maior heterogeneidade. Por tanto, as amostras foram coletadas em duas propriedades no município de Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais. As coletas ocorreram no período seco e no período úmido, a partir de pares de talhões com produtividade contrastante. Os atributos microbiológicos avaliados foram: carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal microbiana (Resp), quociente metabólico (qCO_2), atividades das enzimas urease, β -glicosidase, arilsulfatase, fosfatase ácida e hidrólise do diacetato de fluoresceína, além de análises físico-químicas. Os indicadores microbiológicos permitiram discriminar, principalmente na época seca, talhões com diferentes níveis de produtividade e foram positivamente associados com as maiores produtividades do cafeeiro, com destaque para os atributos: CBM, atividade enzimática da β -glicosidase, arilsulfatase e urease e os atributos químicos P-rem, pH, índice de saturação por bases. Durante a época úmida, esses indicadores tiveram um poder de discriminação menor, porém os talhões de maior produtividade apresentaram relação positiva com a atividade enzimática da urease, alumínio trocável, saturação por alumínio.

PALAVRAS-CHAVE: Coffea arábica L; Saúde do solo; Bioindicador; Microrganismo.

ABSTRACT

The coffee production system represents economic and social importance in both Brazil and Minas Gerais, and faces a challenge in seeking greater efficiency in production, with soil quality being an important factor in maintaining and supporting these productions. In this sense, microbiological indicators emerge as a tool to monitor and predict changes in soil quality to allow adjustments in production practices, resulting in healthier soils and greater productivity. Therefore, the objective was to evaluate the association between soil microbiological indicators and coffee crop productivity in the Atlantic Forest domain, in the state of Minas Gerais, highlighting the inclusion of conditions of greater heterogeneity. Therefore, samples were collected from two properties in the municipality of Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais. Collections occurred in the dry season and in the wet season, from pairs of plots with contrasting productivity. The microbiological attributes evaluated were: microbial biomass carbon (MBC), microbial basal respiration (RESP), metabolic quotient (qCO_2), activities of the enzymes urease, β -glucosidase, arylsulfatase, acid phosphatase and hydrolysis of fluorescein diacetate, in addition to physical-chemical analyses. The microbiological indicators allowed the discrimination, mainly in the dry season, of plots with different levels of productivity and were positively associated with the highest coffee yields, with emphasis on the attributes: MBC, enzymatic activity of β -glucosidase, arylsulfatase and urease and the chemical attributes P-rem, pH, base saturation index. During the wet season, these indicators had a lower discrimination power, but the plots with the highest productivity showed a positive relationship with the enzymatic activity of urease, exchangeable aluminum, and aluminum saturation.

KEYWORDS: *Coffea arabica* L; Soil health; Bioindicator; Microorganism.

1. INTRODUÇÃO

A população mundial é estimada para atingir aproximadamente 9,7 bilhões de pessoas até 2050, de acordo com as projeções da ONU (ONU, 2023). Diante desse crescimento populacional, o setor agrícola enfrenta um desafio crucial para garantir a segurança alimentar dessa crescente população (SAATH; FACHINELLO, 2018). O Brasil é reconhecido como um dos principais fornecedores de alimentos para a população mundial (FAO, 2023), contando com uma área agrícola que abrange uma extensão de terra superior a 87 milhões de hectares, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023). Neste contexto, o país se destaca como o maior produtor mundial de grãos de café (ICO, 2023), com um crescimento de 8,2% em relação ao ciclo anterior de 2022 e uma estimativa para a safra brasileira de café em 2024, aumentando em torno de 5,5%, com 58,082 milhões de sacas de 60 kg em 1,82 milhões de hectares de área plantada (CONAB, 2024).

No Brasil, o estado de Minas Gerais tem liderado como o maior produtor de café arábica, abrangendo aproximadamente 1,073 milhão de hectares, com uma produção de 28,650 mil sacas de 60 kg (CONAB, 2023). Esses destaques podem ser atribuídos às condições climáticas favoráveis e à capacidade de mecanização do solo. Por outro lado, esses solos apresentam limitações em termos de sua fertilidade natural. Para superar essas limitações e manter uma maior produção agrícola, os produtores costumam recorrer ao uso de insumos externos, como fertilizantes e pesticidas (DE SOUZA *et al.*, 2023; PIAO *et al.*, 2019).

Portanto, o grande desafio para o setor cafeeiro é manter uma produção cada vez mais eficiente e com menor impacto ambiental, baseada em uma gestão que garanta a sustentabilidade (TEIXEIRA *et al.*, 2021), com a implementação de práticas de manejo que promovam a conservação da qualidade do solo (FAUCON; HOUBEN; LAMBERS, 2017). A qualidade do solo é determinada pela interação dos atributos físicos, químicos e biológicos; considerando sua capacidade de fornecer condições para manter a produtividade biológica e a qualidade ambiental, dentro das restrições inerentes aos ecossistemas e mesmo em sistemas agrícolas (DORAN; PARKIN, 1994). Nesse sentido, os microrganismos exercem um papel crucial no ecossistema do solo, na decomposição da matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes e influenciando diretamente

sua fertilidade. Essas atividades são essenciais para a disponibilidade de nutrientes às plantas, contribuindo para a sustentabilidade do solo e seu equilíbrio ambiental (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Recentemente, a importância dos indicadores microbiológicos na produtividade da cultura do café foi demonstrada. Aragão *et al.* (2020a) apresentaram as primeiras evidências da relação entre os indicadores microbiológicos de qualidade do solo, o carbono da biomassa microbiana e as atividades enzimáticas da urease e da β -glicosidase. Essas variáveis mostraram-se positivamente correlacionadas a maiores rendimentos de café em condições homogêneas no município de Patrocínio, no Cerrado mineiro. Esses achados reforçam a relevância dos indicadores microbiológicos como ferramentas essenciais para a avaliação e o monitoramento da qualidade do solo e da produtividade cafeeira. Diante disso, torna-se fundamental ampliar os estudos para incluir condições de maior heterogeneidade, abrangendo variações edáficas e climáticas das regiões cafeeiras de Minas Gerais, bem como diferentes variedades de café. Essas investigações são necessárias para validar a relevância da associação entre os indicadores microbiológicos do solo e a produtividade do cafeeiro (ARAGÃO *et al.*, 2020a; PIMENTEL *et al.*, 2011).

Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar a associação entre indicadores microbiológicos do solo (carbono da biomassa microbiana, respiração microbiana basal, cociente metabólico, atividade enzimática β -glicosidase, arilsulfatase, urease, fosfatase e hidrólises de diacetato de fluoresceína) e a produtividade da cultura de café no domínio Mata Atlântica, sendo suas hipóteses: Os indicadores microbiológicos de qualidade do solo, como biomassa microbiana, β -glicosidase e urease, estão mais fortemente relacionados à produtividade do cafeeiro, apresentando maiores valores nos talhões mais produtivos, enquanto o quociente metabólico está negativamente relacionado aos talhões que apresentam as maiores produtividade. Além de que esses indicadores microbiológicos, em comparação com os atributos físico-químicos, são mais discriminantes em relação à produtividade, sendo a capacidade discriminante variando conforme as condições climáticas e apresentando maiores valores durante a estação seca.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização das áreas experimentais

Amostras de solo foram coletadas em duas propriedades: Fazenda de Café Lagoas, do grupo Neumann Kaffee Gruppe (NKG), e Fazenda Samambaia, do grupo Cambraia, no município de Santo Antônio do Amparo, estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). A Fazenda NKG está localizada em 20°52'19" S de latitude, 44°49'41" W de longitude, e a uma altitude de 1034 m, enquanto a Fazenda Samambaia está localizada em 20°58'06.70" S de latitude, 44°53'34.72" W de longitude, e a uma altitude de 1022 m. O clima da região, classificado como *Cwa* segundo a classificação de Köppen, é caracterizado como subtropical de altitude, com invernos secos e verões quentes e úmidos (ALVARES *et al.*, 2013). As precipitações médias anuais são de 1.300 mm, e a temperatura média anual é de 23.0 °C (CLIMATE-DATA.ORG, 2021). O relevo é classificado como ondulado a montanhoso.

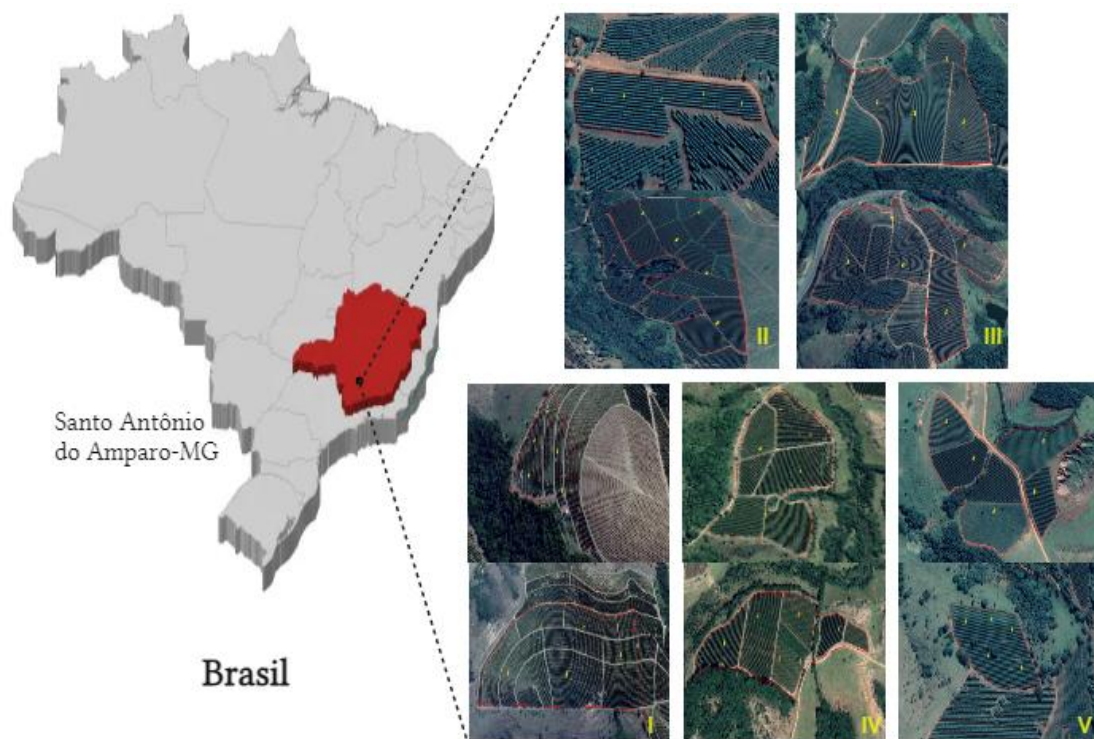


Figura 1. Fazendas NKG Lagoas (superior) e Samambaia (inferior), e pontos de amostragem em amarelo nos cinco pares de talhões selecionados.

2.2. Área de estudo

Nas fazendas NKG e Samambaia, foi realizado um levantamento pedológico em campo em áreas de cultivo de café pré-selecionadas nas datas de 02/08/2021 e 04/08/2021 (MENEZES et al., dados não publicados). O procedimento adotado consistiu na abertura de minitrincheiras, com dimensões de 0.50 X 0.50 X 0.50 m. As variáveis qualitativas dos talhões possibilitaram a classificação dos solos como Latossolo Vermelho (SANTOS *et al.*, 2018). Com as informações desse levantamento pedológico e as informações das fazendas, foi possível padronizar a seleção dos talhões para atender aos pré-requisitos de similaridade dos pares de talhões em relação à variedade, idade do plantio, espaçamento, tipo de solo (Latossolo Vermelho - LV), altitude e contraste de produtividade (maior e menor produtividade) (Tabela 2).

Os talhões selecionados apresentaram manejos representativos das práticas próprias da cultura e gestão agrícola predominantes na região, as quais incluem o uso de corretivos de solo, como calcário, e a aplicação frequente de condicionadores, como a gessagem, além do uso de adubos minerais (até 4 aplicações por ano). As aplicações são baseadas nos resultados de análises de solo. O controle químico da vegetação espontânea é realizado até 3 vezes ao ano, alternando entre pulverizações e uso de roçadeiras. As lavouras são conduzidas sem o uso de irrigação e a colheita é totalmente mecanizada.

Tabela 2. Produtividade por safra em sacos de café por hectare, dos talhões das fazendas NKG e Samambaia nos períodos 2021 – 2022.

Fazenda	Lavoura	ID	Variedade	Safra sc.ha ⁻¹		Média
				2021	2022	
NKG	Galpão	GA LY*	Catuaí 99	19,4	23,3	21,3
	Buraco do lobo	BU HY**	Catuaí 99	34,9	19,8	27,3
	Biazus II	BII LY	Acaiá 474-19	17,9	7,9	12,9
	Biazus III	BIII HY	Acaiá 474-19	19,6	11,1	15,4
Samambaia	Z4	Z4 LY	Acaiá 474-19	-	-	88,4
	Z5	Z5 HY	Acaiá 474-19	-	-	94,5
	CA 20	CA20 LY	Catuaí 62	68	16	42
	CA 16	CA16 HY	Catuaí 62	89	18	53,5
	SA 29	SA29 LY	Catuaí 2SL	-	20	20
	SA 25	SA25 HY	Catuaí 2SL	-	36	36

Legenda: Em função da safra do cafeeiro dos talhões foram obtidas da média da produtividade de 2021 e 2022. (LY)*menor produtividade; ** (HY) maior produtividade (Os valores descritos nas tabelas foram obtidos de planilhas de controle de produtividade cedidas pela gerência das fazendas). No par I, (Z4 e Z5),

as médias obtidas correspondem à produtividade 2020. No par V, (SA29 e AS25), a ausência de produção no ano 2021 deve-se a prática safra zero.

2.3. Amostragem de solo

As coletas de solos foram realizadas em cinco pares de talhões (I, II, III, IV e V), cada um composto por um talhão de maior produtividade (Z5, BU, BIII, CA16 e SA25) e seu talhão de menor produtividade correspondente (Z4, GA, BII, CA20, SA29). Cada par tinha características similares (solo, variedade, idade, adensamento, tipo de solo, altitude) e seguiu um plano de coleta em três datas durante a estação seca (14 e 20 de setembro e 4 de outubro de 2021) e procedimento similar durante a estação úmida (18 e 26 de janeiro e 14 de fevereiro de 2022) para garantir a ordem de prioridade para as análises microbiológicas de acordo com sua sensibilidade ao tempo de armazenamento (ARAGÃO *et al.*, 2020b). Assim, as análises foram realizadas antes do tempo de armazenamento máximo para evitar quedas significativas nos valores dos atributos, sendo que para FDA, arilsulfatase e carbono da biomassa microbiana o tempo para serem avaliados é imediatamente após a retirada das amostras dos talhões, seguidos por respiração basal e urease com até 15 dias, β -glicosidase até de 60 dias e Fosfatase com um tempo de segurança de até 120 dias. Essas premissas foram estabelecidas por ARAGÃO *et al.*, (2020b) para evitar comprometer os resultados e sua interpretação.

O plano de amostragem nos talhões selecionados em cada fazenda foi o seguinte: cada talhão foi dividido em 5 setores e o ponto central de cada setor foi determinado. Em seguida, em cada ponto central, uma amostra de solo composta por cinco subamostras foi coletada, conforme mostrado na Figura 2, todas dentro da projeção da copa das 5 plantas de café selecionadas por ponto de amostragem, usando o trado holandês a uma profundidade de 0-10 centímetros. Essa profundidade foi escolhida especificamente por apresentar uma maior ocorrência do sistema radicular efetivo da cultura e uma atividade microbiana maior. As amostras foram devidamente identificadas e armazenadas em sacos plásticos para posterior processamento e análises no laboratório. Para garantir a preservação as amostras de solo coletadas em cada estação, seca e úmida, foram mantidas em câmara fria a uma temperatura de 4°C até a análise dos indicadores (ARAGÃO *et al.*, 2020b).

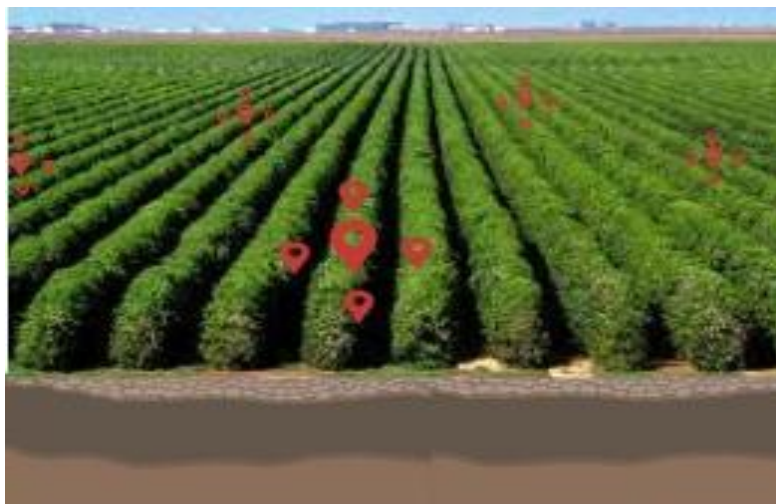


Figura 2. Desenho de amostragem para colheita de amostras simples de solo, para conformar amostras compostas nas áreas cafezeiras por talhão, nas fazendas da NKG lagoas e Samambaia em Santo Antônio do Amparo - MG. Fonte: Do autor (2021).

2.4. Análises de atributos físico-químicos do solo

A caracterização dos atributos físico-químicos nas mesmas amostras utilizadas para avaliação dos indicadores microbiológicos do solo nos talhões das fazendas selecionadas NKG e Samambaia seguiu a conduta normalmente utilizada para as análises de rotina de fertilidade. Estes atributos incluíram pH medido em suspensão no solo e H_2O (1: 2,5); fósforo (P), potássio (K), zinco (Zn), manganês (Mn) e cobre (Cu), extraídos por solução de Mehlich-1 (MEHLICH, 1953); cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al), extraídos por 1 mol L^{-1} KCl (McClean *et al.*, 1958); acidez potencial ($H + Al$) pelo extrator SMP (SHOEMAKER; MCLEAN; PRATT, 1961); soma das bases trocáveis (SB); capacidade efetiva de troca catiônica (t); capacidade de troca catiônica potencial em pH 7,0 (T) calculadas; enxofre (S), extraído por fosfato monocálcico em ácido acético (HOEFT *et al.*, 1973); matéria orgânica (MO), por oxidação com dicromato de potássio em meio ácido (WALKLEY ; BLACK, 1934); e textura, pelo método de Bouyoucos (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

2.5. Carbono da biomassa microbiana (CBM)

O teor de carbono da biomassa microbiana foi avaliado utilizando o método de fumigação e extração, conforme descrito por Brookes *et al.*, (1985) e Vance *et al.*, (1987). Vinte gramas de

cada amostra de solo foram pesados, com seis repetições, sendo que três delas foram submetidas a um processo de fumigação em um dessecador contendo 30 ml de clorofórmio e com uso de bomba de vácuo foi extraído o ar do sistema, enquanto as três restantes não passaram por essa etapa. Posteriormente, todas as amostras foram incubadas no escuro a uma temperatura de 27°C por 24 horas. Para a etapa de extração, foram adicionados 50 ml de solução de K_2SO_4 (0,5 M) e agitados por 30 minutos. Em seguida, a suspensão resultante foi filtrada usando papel filtro do tipo Química Moderna nº. 42. O teor de carbono microbiano foi determinado através da digestão de 8 ml do extrato filtrado, na presença de 2 ml de $K_2Cr_2O_7$, 10 ml de H_2SO_4 (95%) e 5 ml de H_3PO_4 (85%). Essa mistura precisou ser aquecida durante 5 minutos e, após o resfriamento, titulada com sulfato ferroso de amônio na presença de difenilamina como indicador. O controle seguiu o mesmo procedimento, porém sem a adição do extrato.

2.6. Respiração basal microbiana (RBM)

Para estimar a evolução do dióxido de carbono (CO_2) durante o processo de incubação, seguiu-se o método descrito por Alef (1995). Foram pesados 20 gramas de cada amostra de solo e colocados em frascos herméticos de vidro, aos quais foram adicionados 20 mL de uma solução de NaOH (0,5 M), próximo à amostra de solo em um béquer de vidro, para serem incubados no escuro por um período de 72 horas. Para o controle, foram utilizados três frascos contendo apenas 20 mL de NaOH e incubados nas mesmas condições, mas sem a presença de amostra de solo. Após o período de incubação, o CO_2 capturado pelo NaOH foi precipitado pela adição de 5 mL de uma solução de $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ (0,5 M). O NaOH não reagido foi titulado com HCl (0,5 M), adicionando três gotas de fenolftaleína (0,1%) como indicador, até que a solução mudasse de cor rosa para incolor.

2.7. Obtenção do Quociente Metabólico (qCO_2)

O quociente metabólico foi determinado a partir da razão entre respiração microbiana basal e carbono da biomassa microbiana. O resultado foi obtido em $\mu g.C-CO_2 \mu g^{-1} MBC \text{ dia}^{-1}$ de acordo com a proposta metodológica de Anderson e Domsch (1993).

2.8. Quantificação da atividade da β -glicosidase

Para quantificar a atividade da enzima β -glicosidase, utilizamos métodos baseados em ensaios colorimétricos com substratos específicos, seguindo o protocolo descrito por Dick *et al.*, (1996). Pesou-se um grama de solo de cada amostra, ao qual adicionamos 4,0 ml de uma solução universal modificada (MUB) com pH 6,0 e 1,0 ml de uma solução contendo p-nitrofenil- β -D-glicosídeo (PNG). Em seguida, os erlenmeyers contendo essa mistura foram agitados e incubados a 37°C por 1 hora. Após o período de incubação, adicionamos 1,0 ml de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,5M) e 4,0 ml de THAM (0,1M), uma solução de tris hidroximetil aminometano com pH 12. O controle seguiu o mesmo procedimento, porém o substrato PNG foi adicionado após a incubação e interrupção da reação. Em ambos os casos, os extratos foram filtrados em papel filtro do tipo Química Moderna nº. 42. A solução adquire uma coloração amarelada e a concentração de p-nitrofenol liberado após a reação enzimática foi estimada a partir de uma curva padrão e das leituras de cada amostra a 410 nm em um espectrofotômetro.

2.9. Quantificação da atividade da arilsulfatase

Para a arilsulfatase, seguiu-se a metodologia descrito por Dick *et al.*, (1996), que emprega p-nitrofenil sulfato (PNS) como substrato. Inicialmente, foram pesadas amostras de solo de um grama em um erlenmeyer, aos quais foram adicionados 4,0 mL de uma solução de acetato e 1,0 mL de uma solução de p-nitrofenil sulfato (PNS). As amostras foram incubadas a 37°C por 1 hora. A reação foi interrompida pela adição de 1,0 mL de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,5 M) e 4,0 mL de NaOH (0,5 M). Nos controles, seguiu-se os mesmos procedimentos, alterando apenas a sequência de adição do substrato PNS, que foi inserido somente após a etapa de interrupção da reação. Em ambos os casos, os extratos foram filtrados em papel filtro do tipo Química Moderna nº. 42. A concentração de p-nitrofenol liberado após a reação enzimática foi estimada a partir de uma curva padrão contendo as concentrações de 0, 2,5; 5; 7,5 e 10 μg de p-nitrofenol por mL. e das leituras de cada amostra a 410 nm em um espectrofotômetro. Os valores obtidos foram expressos em μg p-nitrofenol $\text{h}^{-1}\text{g}^{-1}$.

2.10. Quantificação da atividade de urease

Para quantificar a atividade da urease, foi utilizado o método baseado na liberação de amônia após a incubação do solo com uma solução de ureia, seguindo o protocolo descrito por Tabatabai e Bremner (1972). Cinco gramas de solo foram pesados em erlenmeyers, aos quais adicionamos 9,0 mL de THAM a pH 9,0 e 1,0 mL de uma solução de ureia ($0,2 \text{ mol L}^{-1}$). Essa mistura foi mantida a 37°C em uma câmara de incubação por 2 horas. Após esse período, para interromper a reação, foram adicionados 35 mL de uma solução de $\text{KCl-Ag}_2\text{SO}_4$. Em seguida, 20 mL da solução foram pipetados em tubos de vidro que continham 0,2 g de MgO . Em seguida, os tubos foram transferidos para um microdestilador. O destilado resultante foi coletado em um 46erlenmeyer contendo uma solução indicadora de ácido bórico e indicadores de vermelho de metila e verde de bromocresol. Posteriormente, foi titulado com uma solução padronizada de H_2SO_4 ($0,005\text{M}$) para determinar a quantidade de amônia liberada. O controle seguiu o mesmo procedimento, com a única diferença de que a ureia foi adicionada após a adição da solução de $\text{KCl-Ag}_2\text{SO}_4$.

2.11. Determinação da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA)

Para determinar FDA, seguiu-se o método de Diack (1997), que utiliza a liberação de fluoresceína como indicador. Inicialmente, foram pesados 2 g de solo e colocados em um tubo Falcon de 50 mL. Sendo adicionados em cada tubo 40 mL de uma solução de fosfato de sódio com pH 7,0 contendo diacetato de fluoresceína. Em seguida, os tubos foram tampados e incubados em agitação rotativa a 35°C por um período de 24 horas. Após esse período, foi interrompida a reação com a adição de 2,0 mL de acetona à mistura. Foi centrifugada a mistura a 3840 rpm por cinco minutos, seguindo a etapa da filtragem. O sobrenadante resultante foi disposto em um espectrofotômetro a 490 nm para quantificar a fluoresceína liberada. O procedimento foi repetido para as amostras estabelecidas como controle, com a única diferença de que não foi adicionado o substrato (diacetato de fluoresceína). A concentração de p-nitrofenol liberado após reação enzimática foi estimada a partir de uma curva padrão com os níveis de 0; 2,5; 5; 7,5 e $10 \text{ } \mu\text{g p-nitrofenol mL}^{-1}$. Os resultados obtidos foram expressos em $\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1}\text{g}^{-1}$.

2.12. Quantificação da atividade da fosfatase ácida

A mensuração da atividade da fosfatase é baseada na leitura em espectrofotômetro do p-nitrofenol resultante da atividade enzimática, conforme descrito por Dick *et al.*, (1996). Foi utilizado 1 g de solo, adicionando as seguintes soluções: 4 ml de tampão (pH 6,5) e 1 ml de p-nitrofenil-fosfato (PNP). A amostra foi levada à incubação a 37 °C durante 1 hora. As amostras controles não receberam PNP até o fim do processo de incubação e, para interromper a reação, foi adicionado 1 ml de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,5 M) e 4 de NaOH (0,5M). Posteriormente, todas as amostras foram filtradas em papel de filtro do tipo Química Moderna nº 42e lidas em um espectrofotômetro de acordo com as intensidades da cor resultante a 410 nm. A concentração de p-nitrofenol liberado após reação enzimática foi estimada a partir de uma curva padrão com os níveis de 0; 2,5; 5; 7,5 e 10 μg p-nitrofenol mL^{-1} . Os resultados obtidos foram expressos em μg p-nitrofenol $\text{h}^{-1}\text{g}^{-1}$.

2.13. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos a uma análise exploratória para identificar potenciais problemas. Os indicadores foram modelados por análise de variância usando o método de mínimos quadrados generalizados devido à heterogeneidade de variância entre talhões. Após a modelagem, os resíduos do modelo foram visualmente inspecionados para verificar as premissas (normalidade, homogeneidade dos resíduos padronizados e independência). Após o ajuste dos modelos, as médias dos pares de talhões de maior e menor produtividade foram comparadas usando o teste t de Student ($p < 0,05$), com correção dos p-valores em função do número de comparações para evitar a inflação do erro tipo I. Além disso, foi realizada uma análise de componentes principais parcial (PCA), removendo previamente o efeito de cada par de talhão, para determinar a relação entre as variáveis indicadoras de qualidade microbiológica de cada talhão. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software estatístico R, utilizando a interface R Studio versão 4.3.3.

3. RESULTADOS

3.1. Atributos físicos e químicos

Os valores de referência dos atributos físicos e químicos para o cafeeiro foram os descritos por Mesquita *et al.* (2016) e pelo Manual de Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes

de solo em Minas Gerais, conforme elaborado por Guimarães *et al.*, (1999). Os valores de pH se enquadraram na faixa boa nos talhões BU, BII e BIII. Os demais talhões apresentaram níveis inferiores a 5,42 sendo classificados como baixos na estação seca. Durante a estação úmida, os valores de pH variaram entre 6 e 7, indicando um nível alto (Tabela A anexa). Quanto aos macronutrientes P, K, Ca, Mg e S, todas as áreas apresentaram níveis de médio a muito bom, tanto na estação seca quanto na estação úmida (Tabela A, B anexa).

Já em relação aos micronutrientes Zn, B, Cu, Mn e Fe, os talhões corresponderam a uma classe de fertilidade compreendida entre média-alta na estação seca, com exceção do talhão BU, que apresentou um nível baixo de Fe, e do CA20, que teve um nível baixo de Mn. Na estação úmida, os talhões corresponderam a uma classe de fertilidade entre média-alta, com exceção dos talhões SA25, que apresentou um nível baixo de Zn, BII baixo de Fe, CA20 baixo de Mn e CA16 baixo de B. No complexo de troca catiônica, os resultados das áreas apresentaram valores considerados médios a bom e adequados para a cultura nas estações, incluindo a evidência do predomínio da fração argila nos solos das áreas, independentemente das estações avaliadas (Tabela A, B anexa).

3.2. Carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana e coeficiente metabólico

Na estação seca, o carbono da biomassa microbiana (CBM) apresentou diferenças estatisticamente significativas consistentes entre os talhões de café de maior produtividade, quando comparados aos respectivos pares de menor produtividade (Figura 3a), com exceção do par IV que apresentou inversão do efeito, sendo encontrado o maior valor CBM no talhão de menor produtividade CA20. Por outro lado, nos pares I, II, III e V, os talhões de maior produtividade Z5, BU, BIII e SA25 exibiram maiores valores de CBM sendo superiores entre 35,97% e 41,45% em comparação aos seus pares de menor produtividade, confirmando essa tendência em diferentes cultivares e condições produtivas. Na estação úmida, o CBM não conseguiu distinguir entre os talhões por produtividade, com exceção do par I, onde o talhão mais produtivo Z5 do cultivar Acaia 474 exibiu o valor de CBM significativamente maior, com 64,32%, em relação ao seu respectivo par Z4 de menor produtividade.

Na estação seca, diferenças altamente significativas na respiração basal microbiana (RESP)

foram observadas apenas nos pares II e V, com resultados contrastantes. No par II, o talhão BU do cultivar Catuaí 99, mais produtivo, apresentou uma RESP 182,08% superior à do talhão GA (BU = 116,76 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo seco dia⁻¹; GA = 41,41 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo seco dia⁻¹) (Figura 3b). Já no par V, ocorreu o oposto: o talhão SA29 do cultivar Catucaí 2SL exibiu uma RESP 62,12% maior que seu par SA25, de maior produtividade (SA29 = 588,73 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo dia⁻¹; SA25 = 363,22 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo dia⁻¹). Na estação úmida, a RESP não foi capaz de distinguir entre os talhões em relação à produtividade, exceto pelo par V, que mostrou uma diferença estatisticamente significativa no talhão SA29, apresentando uma atividade de RESP 100,23% superior em comparação com o talhão SA25 (SA25 = 82,04 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo dia⁻¹ e SA29 = 164,27 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo dia⁻¹) (Figura 3b).

Em relação ao quociente metabólico (qCO₂), os dados foram contrastantes. Durante a estação seca, os pares II e IV apresentaram um qCO₂ significativamente maior nos talhões de maior produtividade BU e CA16 (BU = 0,48 mg C-CO₂ g⁻¹ CBM dia⁻¹ e CA16 = 1,16 mg C-CO₂ g⁻¹ CBM dia⁻¹), sendo 118,18 % e 28,88%, respectivamente superiores quando comparados aos talhões de menor produtividade GA, e CA20. Já em relação ao par V, este apresentou diferença estatística, porém exibiu uma maior atividade do indicador qCO₂, 104,35% superior no talhão SA29 de menor produtividade (SA29 = 1,88 mg C-CO₂ g⁻¹ CBM dia⁻¹) (Figura 3c). Na estação chuvosa, o indicador qCO₂ teve diferenças estatísticas nos pares I, II e V indicando que os talhões de café de menor produtividade apresentaram um maior qCO₂ (Z4 = 0,43 mg C-CO₂ g⁻¹ CBM dia⁻¹ e GA = 1,13 mg C-CO₂ g⁻¹ CBM dia⁻¹ e SA29 = 0,57 mg C-CO₂ g⁻¹ CBM dia⁻¹), sendo 104,76% e 48,68% e 67,64%, respectivamente, superiores aos talhões de maior produtividade Z5, BU e SA25. (Figura 3c).

a

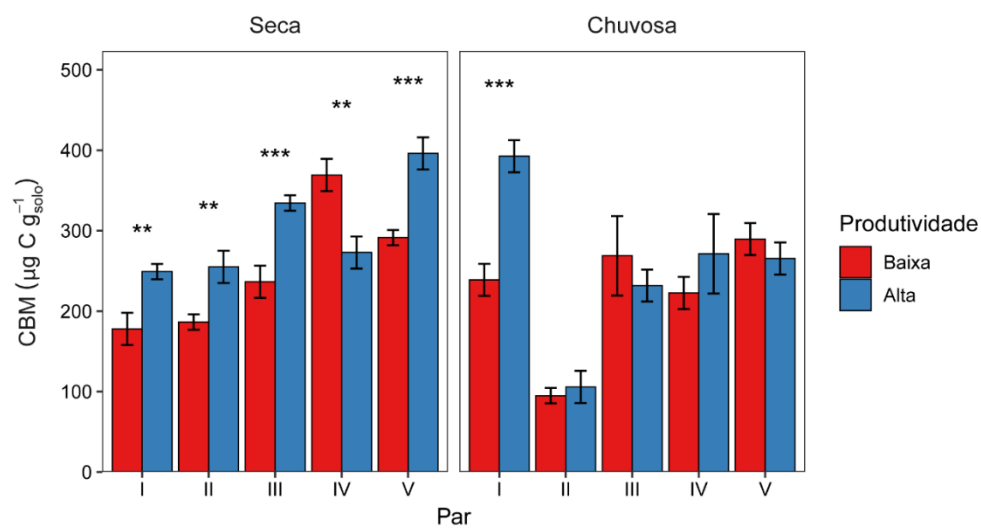
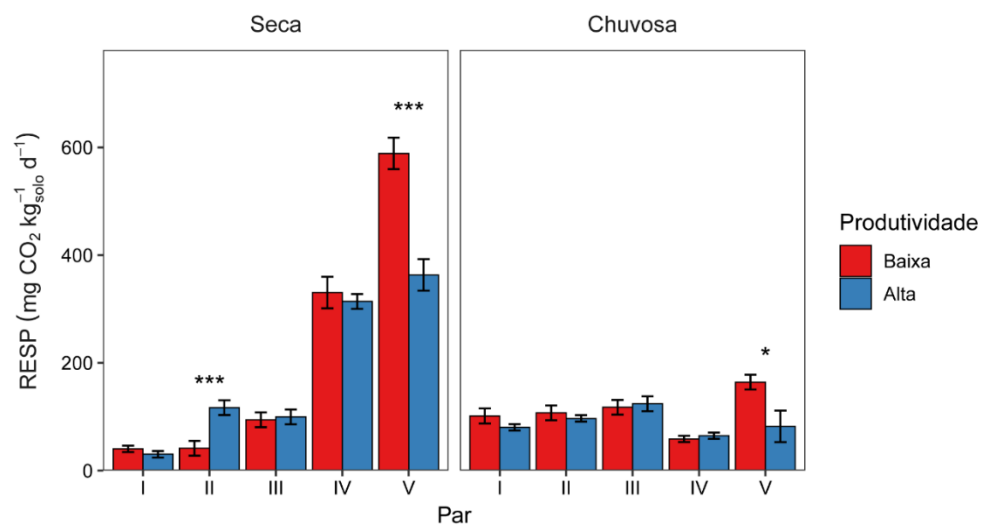
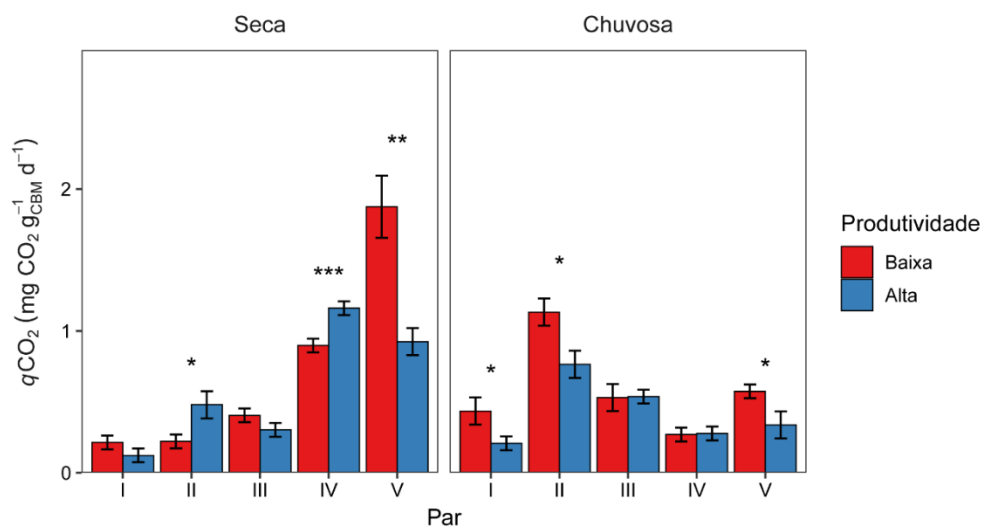
**b****c**

Figura 3. Indicadores microbiológicos do solo em áreas de café com baixa e alta produtividade durante a estação seca (à esquerda) e chuvosa (à direita).

Considerando: (3a) carbono da biomassa microbiana, (3b) respiração basal microbiana e (3c) coeficiente metabólico. Os pares de comparação correspondem a cafezais dentro da mesma fazenda, diferenciados pela produtividade: I – Samambaia Z4 (baixa) / Samambaia Z5 (alta); II – Galpão (baixa) / Buraco do Lobo (alta); III – Biazus II (baixa) / Biazus III (alta); IV – CA20 (baixa) / CA16 (alta); e V – SA29 (baixa) / SA25 (alta). As barras de erro representam o erro-padrão da média. Os asteriscos indicam diferenças significativas entre áreas com diferentes produtividades dentro de cada par, conforme: *** $p \leq 0,001$; ** $p \leq 0,01$.

3.3. Atividade enzimática dos dez talhões de café

Na estação seca, a atividade enzimática da β -glicosidase foi maior nos talhões com maior produtividade, especificamente nos pares I, II e IV, os quais apresentaram diferença estatística significativa. No par I, o talhão de maior produtividade Z5, do cultivar Acaíá 474, exibiu atividade enzimática 38,86% superior quando comparado ao talhão Z4, de menor produtividade ($Z5 = 238,47 \mu\text{g } \rho\text{-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$) (Figura 4a). A mesma tendência da atividade enzimática foi observada no par II, onde o talhão BU, de maior produtividade, do cultivar Catuaí 99, foi 93,97% superior em comparação com a atividade exibida no talhão de menor produtividade GA ($BU = 326,01 \mu\text{g } \rho\text{-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$). No par IV, houve um aumento de 25% na atividade enzimática de β -glicosidase no talhão CA16, de maior produtividade, em comparação com seu respectivo par de menor produtividade CA20 ($CA16 = 177,72 \mu\text{g } \rho\text{-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$) (Figura 4a). No entanto, durante a estação úmida, a β -glicosidase demonstrou capacidade de discriminação da produtividade apenas no par V, onde o talhão SA29, da variedade Catucaí 2SL, de menor produtividade, exibiu uma atividade enzimática de β -glicosidase 126,70% superior ao talhão de maior produtividade SA25 ($SA29 = 107,95 \mu\text{g } \rho\text{-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$) (Figura 4a).

Para a atividade enzimática da urease, na estação seca, foram encontradas diferenças estatísticas significativas nos pares I e IV. No par I, o talhão Z5 de maior produtividade, apresentou atividade 734,75% superior quando comparado ao talhão Z4 de menor produtividade ($Z5 = 31,81 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$) (Figura 4b). A mesma tendência foi observada no par IV, onde o talhão CA16 de maior produtividade, apresentou atividade 218,46% superior em relação ao talhão CA20 de menor produtividade ($CA16 = 38,64 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$) (Figura 4b). É importante mencionar que, embora os demais pares (II, III e V) não tenham mostrado diferenças estatísticas, as tendências foram sempre a favor dos talhões de maior produtividade. Na estação úmida, a urease conseguiu diferenciar entre os talhões em termos de produtividade. No par II, o

talhão BU de maior produtividade, a atividade foi 51,31% superior ao talhão GA ($BU = 32,10 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$) (Figura 4b). No par III, o talhão BIII de maior produtividade, exibiu uma atividade 65,07% superior em comparação ao talhão BII de menor produtividade ($BIII = 64,37 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$). Em relação ao par IV, o talhão CA16 de maior produtividade, foi 66,73% superior em relação ao talhão CA20 de menor produtividade ($CA16 = 33,47 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$). No entanto, os resultados do par V não seguiram a mesma tendência observada nos pares I, II, III e IV. Portanto, a atividade da urease foi significativamente maior no talhão de menor produtividade, SA29, com um aumento de 36,67% em comparação ao talhão SA25 de maior produtividade ($SA29 = 54,00 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$) (Figura 4b).

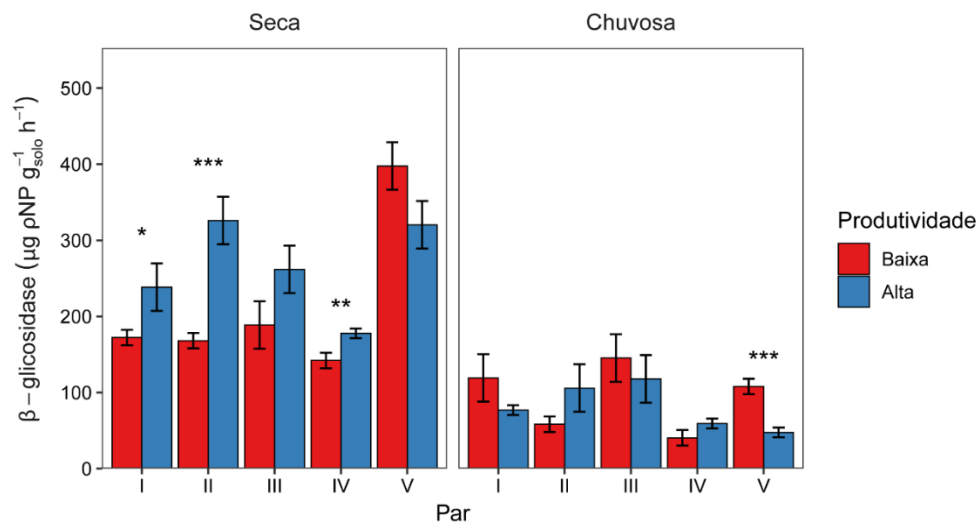
Para a atividade enzimática da arilsulfatase durante a estação seca, observou-se apenas que no par IV houve uma maior atividade enzimática, com diferença estatística significativa a favor do talhão de maior produtividade CA16, que exibiu atividade 116,83% superior ao par de comparação CA20 de menor produtividade (Figura 4c). Já durante a estação úmida, apesar de apresentar diferença estatística nos pares IV e V, os resultados foram contrastantes. Para o par IV o talhão de maior produtividade CA16 teve uma atividade significativamente maior, sendo 107,77% superior ao talhão de menor produtividade CA20. (Figura 4c). Já para o par V, o talhão SA29 de menor produtividade apresentou maior atividade enzimática, sendo 212,29% superior quando comparada com o talhão SA25 de maior produtividade (Figura 4c).

Resultados inconsistentes foram observados para a hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA). Na estação seca, nos pares III e V, foram observadas diferenças estatisticamente significativas em favor dos talhões de maior produtividade, BIII e SA25, que foram 21,65% e 25,91% superiores, respectivamente, em comparação com os talhões de menor produtividade, BII e SA29 (Figura 4d). Por outro lado, no par I e IV, os talhões de menor produtividade, Z4 apresentou diferença de 5,6% e o talhão CA20, apresentou diferença foi 34,86% superior em relação aos seus pares de comparação de maior produtividade, Z5 e CA16 (Figura 4d). Na estação úmida, a atividade apresentou um comportamento similar ao descrito para a estação seca. No par II, o talhão de maior produtividade, BU, apresentou uma diferença estatisticamente significativa e exibiu uma atividade da FDA 31,34% superior em comparação com seu par de menor produtividade, GA (Figura 4d). Em contraste, nos pares IV e V, os talhões de menor produtividade, CA20 e SA29, exibiram diferenças estatisticamente significativas e uma atividade superior em 24,12% e 14,43%,

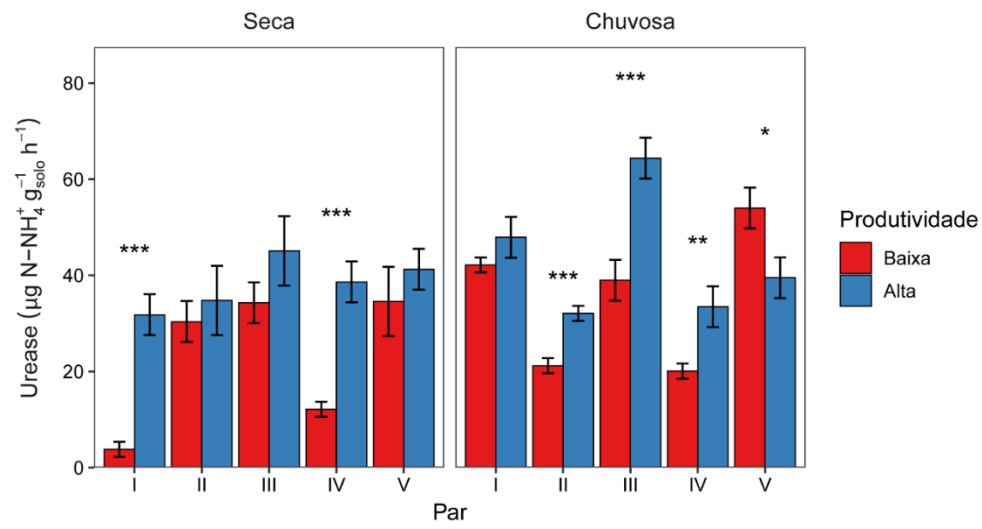
respectivamente, quando comparados com os talhões de maior produtividade, CA16 e SA25 (Figura 4d).

Por último, a atividade enzimática da fosfatase ácida evidenciou, na estação seca, diferença estatística, no par I, no talhão Z5 de maior produtividade, apresentou uma maior atividade enzimática 19,9% em comparação com o talhão Z4, talhão de menor produtividade (Figura 4e). No caso do talhão V, porém, o comportamento da atividade foi contrário, a maior atividade enzimática foi apresentada no talhão SA29, de menor produtividade, com um aumento de 36,0% em relação ao talhão SA25 (Figura 4e). Durante a estação úmida, a atividade da fosfatase apresentou diferença estatística apenas no par V, com uma atividade maior no talhão SA29, de menor produtividade, com um aumento de 54,24% na atividade da fosfatase em comparação com o talhão SA25 (Figura 4e).

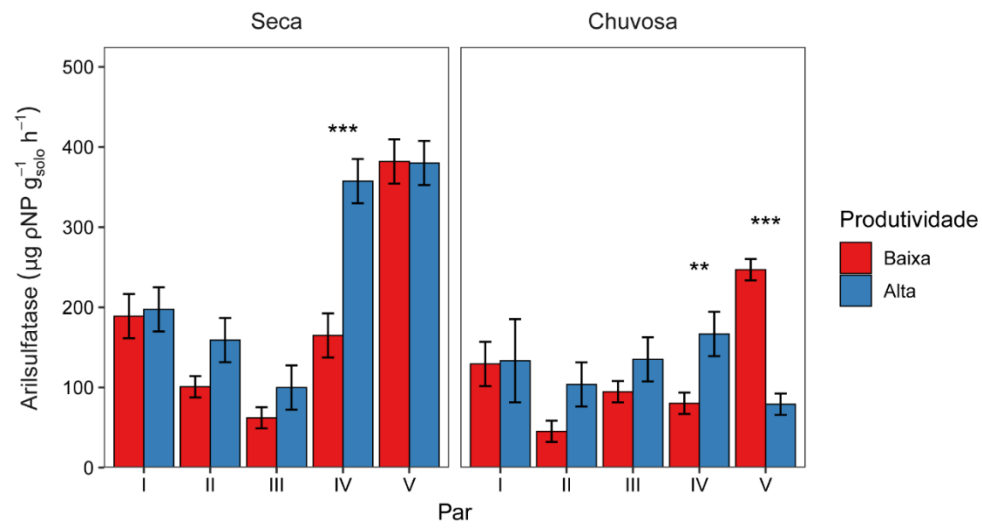
a



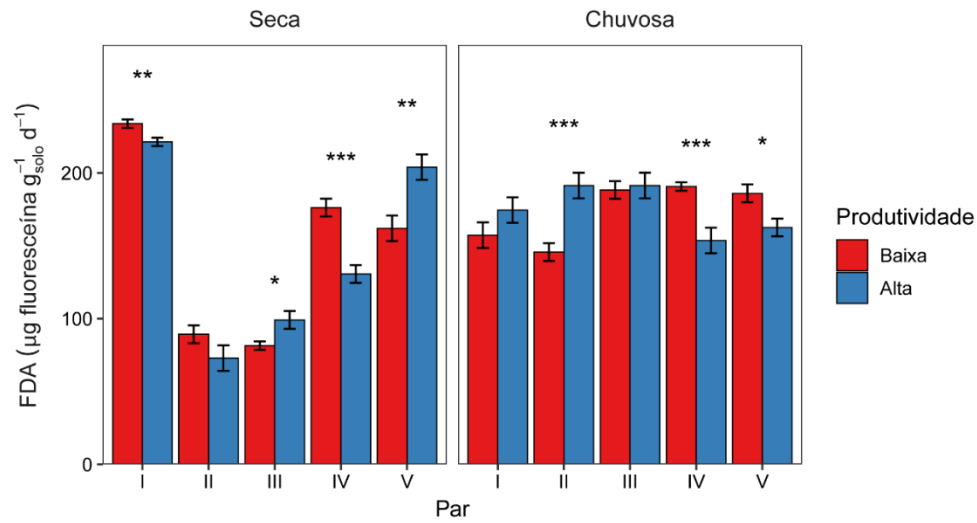
b



c



d



e

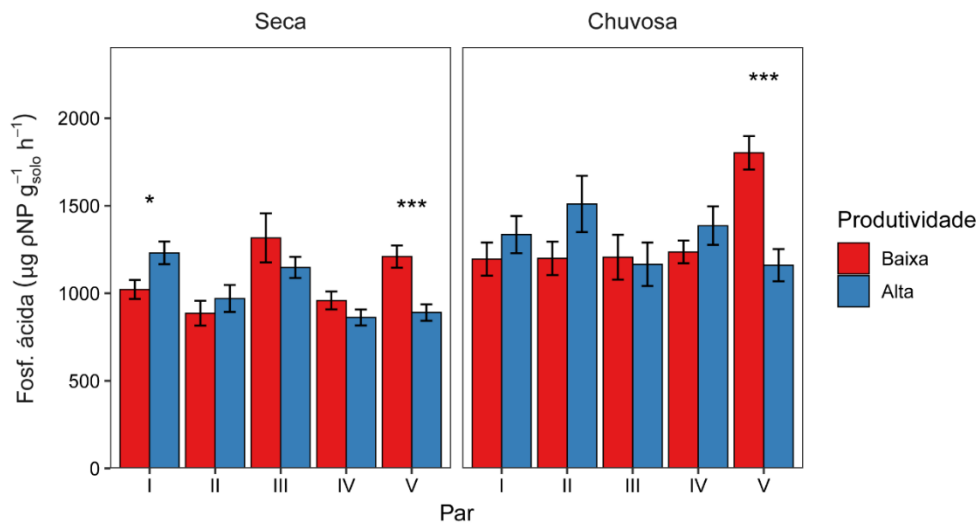


Figura 4. Atividade enzimática do solo para áreas de café com baixa e alta produtividade na estação seca (à esquerda) e chuvosa (à direita).

Considerando as enzimas (a) β -glicosidase, (b) urease, (c) arilsulfatase, (d) hidrólise do diacetato de fluoresceína e (e) fosfatase ácida. Os pares de comparação correspondem a cafezais dentro da mesma fazenda, diferenciados pela produtividade: I – Samambaia Z4 (Baixa) / Samambaia Z5 (Alta); II – Galpão (Baixa) / Buraco do Lobo (Alta); III – Biazus II (Baixa) / Biazus III (Alta); IV – CA20 (Baixa) / CA16 (Alta); e V – SA29 (Baixa) / SA25 (Alta). As barras de erro representam o erro-padrão da média. Os asteriscos indicam diferenças significativas entre áreas com diferentes produtividades dentro de cada par, conforme: *** $p \leq 0,001$; * $p < 0,05$.

3.4. Análises de componentes principais dos atributos físicos e químicos nos talhões de café de maior e menor produtividade na estação seca e úmida

Os resultados da análise de componentes principais (PCA) para atributos físico-químicos nos talhões de diferentes níveis de produtividade na estação seca são representados pelos dois componentes principais: PC1 e PC2. Esses componentes representam 47,7% da variação total do conjunto de dados (Figura 5a). Essa análise permitiu a segregação dos talhões de maior e menor produtividade, sendo auxiliada pela maior representação nas componentes pelos indicadores P-rem, pH, V, que estão mais associados aos talhões de maiores produtividades. Esses indicadores mostraram uma capacidade limitada de segregação dos talhões de menor e maior produtividades. O indicador H+Al apresentou forte associação com os gradientes de produtividade dos talhões de menor produtividade, estando na direção da separação. Por outro lado, indicadores como areia, Cu, Mn, OM, m, Silte, Al, e T não se relacionaram com a separação entre talhões de menor e maior produtividade.

Na estação úmida, as duas componentes principais representaram 44.9% da variação total dos dados e permitiram também uma segregação limitada dos talhões de maior e menor produtividade. Os indicadores Al e m associaram-se aos talhões de maior produtividade, indicando capacidade de associação e discriminação entre os talhões. Por outro lado, os indicadores de maior fertilidade P, V, Mg e Zn foram associados aos talhões de menor produtividade. Os indicadores Sand, H+Al, Silt, argila, Cu, OM, Mn, T, t, Ca e SB não contribuíram para a separações entre os talhões de maior e menor produtividade (Figura 5b).

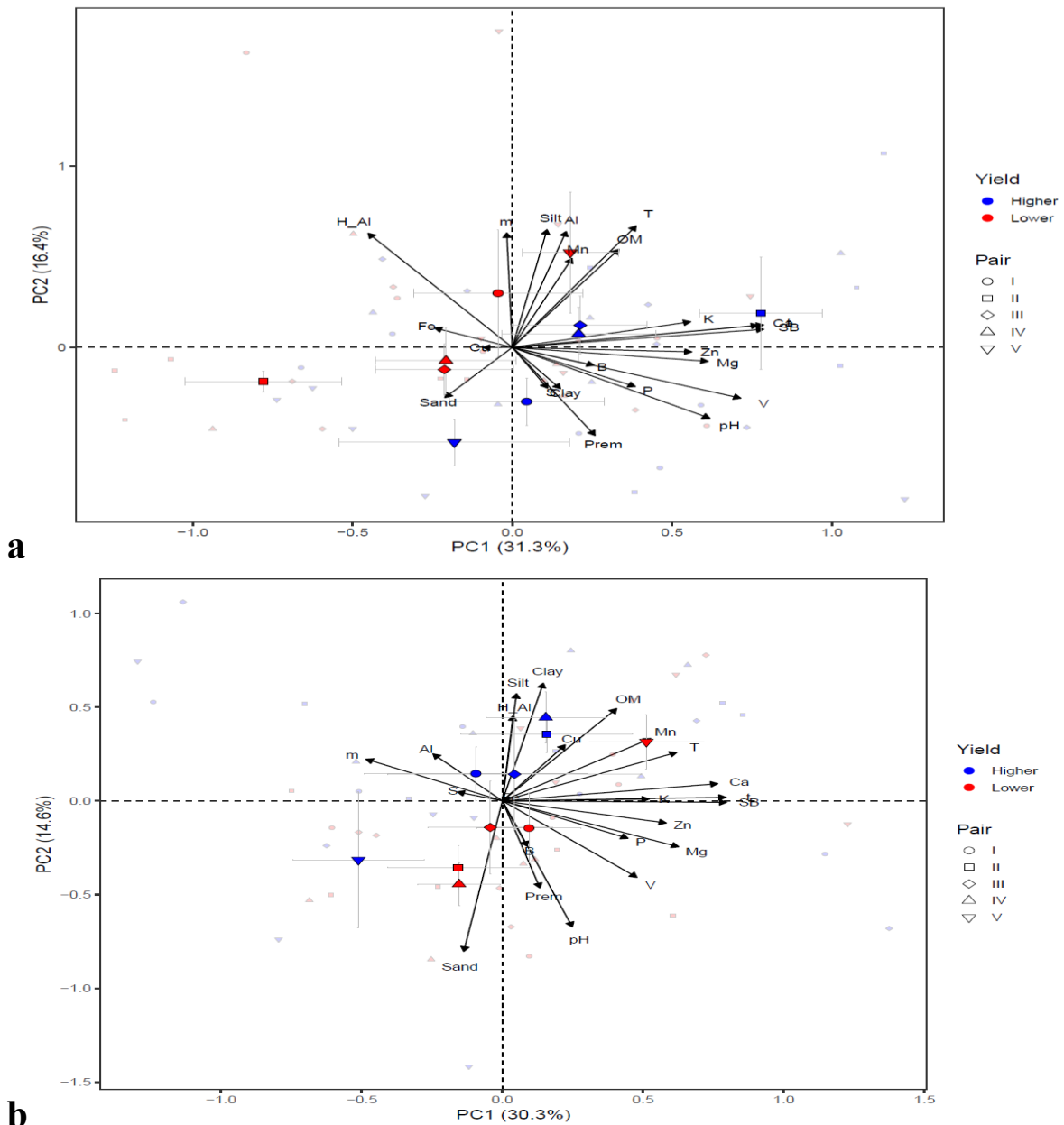
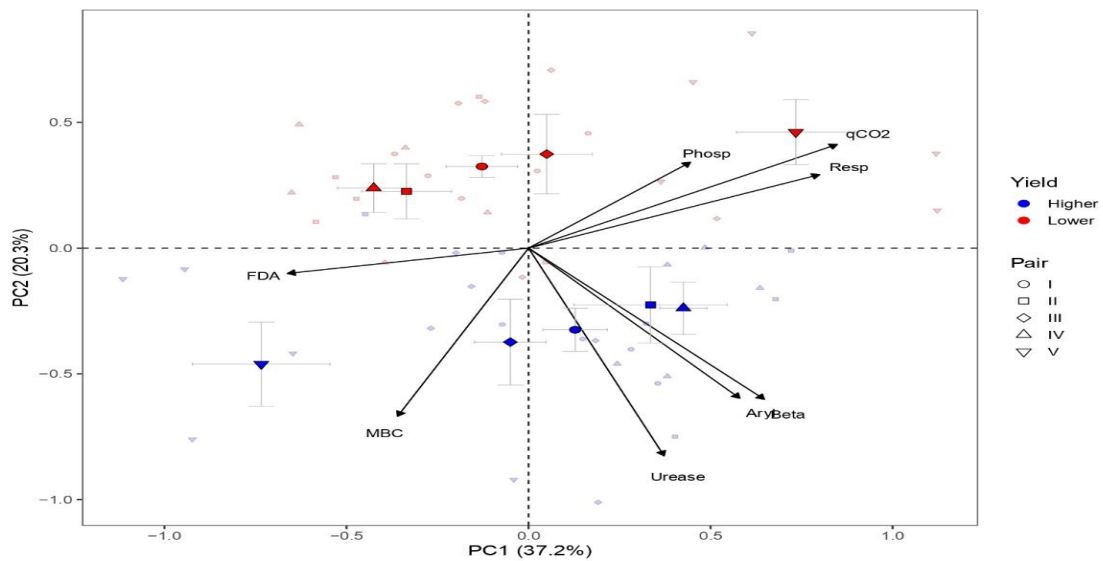


Figura 5 Análise de componentes principais (PCA) em talhões com diferentes níveis de produtividade. Atributos químicos e físicos, (a) estação seca, (b) estação chuvosa, Azul: talhões com maior produtividade; Vermelho: talhões com menor produtividade; par I (Z4, Z5) par II (GAL, BU), par III (BII, BIII), par IV (CA20, CA16), Par V (SA29, SA25) pH: acidez ativa; H-Al: acidez potencial; Al: alumínio; OM: matéria orgânica; t: capacidade efetiva de troca catiônica; V: saturação por bases; T: Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; m: Índice de Saturação de Alumínio; P-rem: Fósforo Remanescente; Macronutrientes: P, K, Ca, Mg, S; Micronutrientes: B, Cu, Fe, Mn, Zn; Textura: Clay, Silte, areia.

3.5. Análises de componentes principais dos indicadores microbiológicos nos talhões de café de maior e menor produtividade na estação seca e úmida

Os resultados da PCA para atributos microbiológicos nos talhões de diferentes níveis de produtividade na estação seca são representados em seus dois componentes principais: 37,25% no eixo 1 e 20,3% no eixo 2 (Figura 6a). Os indicadores carbono da biomassa microbiana, β -glicosidase, urease e arilsulfatase foram os atributos que melhor segregaram os talhões de maior produtividade dos talhões de menor produtividade. Por outro lado, os indicadores hidrólise do diacetato de fluoresceína, respiração basal microbiana, quociente metabólico e fosfatase ácida tiveram baixo nível de associação com os gradientes de produtividade dos talhões. Na estação úmida, as duas componentes resultantes da PCA para os atributos microbiológicos representaram 63,4% da variância total do conjunto de dados (Figura 6b). No eixo 1, foi representado 38,6%, enquanto no eixo 2, foi representado 24,8%. Os atributos microbiológicos, na estação úmida, não apresentaram a capacidade de discriminação entre talhões de maior e menor produtividade observada na época seca.

a



b

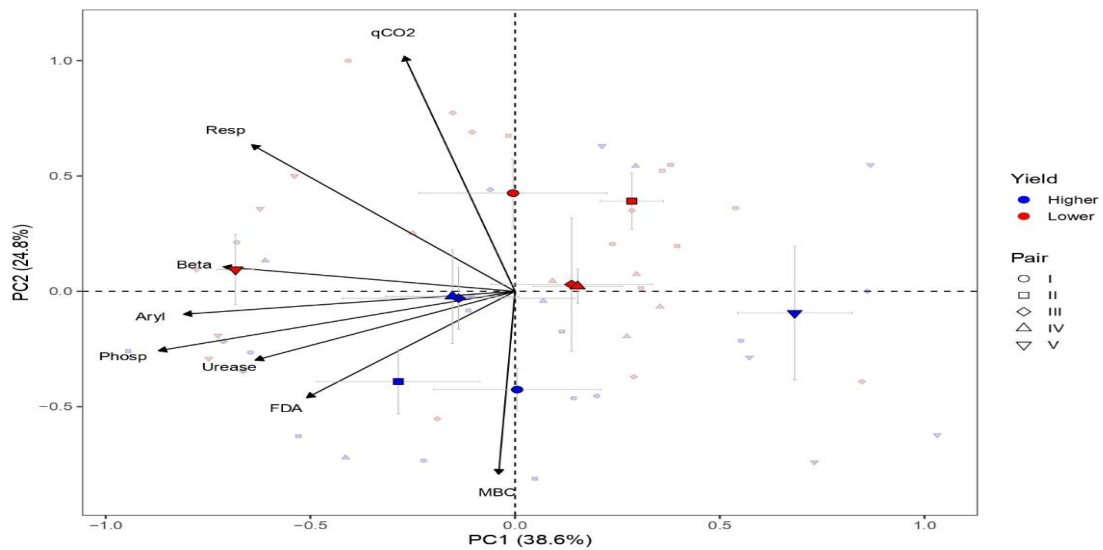


Figura 6. Análise de componentes principais (PCA) em talhões com diferentes níveis de produtividade. a) atributos microbiológicos, (a) estação seca, (b) estação chuvosa.

Azul: talhões com maior produtividade; Vermelho: talhões com menor produtividade; par I (Z4, Z5) par II (GAL, BU), par III (BII, BIII), par IV (CA20, CA16), Par V (SA29, SA25). MCB: Carbono de biomassa microbiana; Resp: respiração basal microbiana; qCO₂: quociente metabólico; Beta: β-glicosidase; Aryl: Arilsulfatase; Urease; Phosp: Fosfatase acida; FDA: hidrólise do diacetato de fluoresceína.

4. DISCUSSÃO

4.1. Atributos físicos, químicos, carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana e coeficiente metabólico

A qualidade do solo é essencial para o sucesso das produções agrícolas e é determinada pela interação entre os atributos físicos, químicos e biológicos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; PAZ-FERREIRO; FU, 2016). Os atributos físico-químicos do solo avaliados neste estudo, que incluem os teores de macronutrientes, micronutrientes e atributos associados à fertilidade, estavam adequados para a cultura de cafeeiro, independentemente da estação de amostragem de solos (MESQUITA *et al.*, 2016). Porém, os talhões com maior produtividade estão associados a uma maior fertilidade no período seco (Tabela anexa A). Especificamente, foram geralmente observados maiores valores de indicadores como V, pH, K, Ca, Mg, SB, t, T, V, MO, Zn, Mn, Cu, B nos talhões de maior produtividade no período seco. No entanto, esse efeito se inverteu na estação úmida, havendo geralmente maior fertilidade nos talhões de menor produtividade, com maiores valores de pH, K, Ca, Mg, Zn, V, SB, t. (Figura 5 a,b.)

Essa diferença na fertilidade do solo no período seco nos talhões de maior produtividade

foi um efeito inesperado neste trabalho, pois tanto os talhões de maior quanto os de menor produtividade foram submetidos a práticas de manejo agrícola semelhantes. Os indicadores de fertilidade na época úmida apresentaram geralmente maiores valores do que na época seca, o que pode estar associado à aplicação de fertilizantes antes da amostragem de solos nos talhões entre os meses de janeiro e fevereiro (Tabela anexa A, B.). Também pode ser que a maior fertilidade observada na época úmida nos talhões de menor produtividade seja uma compensação pela menor produtividade, com o produtor acrescentando maiores doses de adubos ou pelo início da transição do estágio fenológico da cultura de chumbinho para a expansão rápida e granação, que são estágios de maiores extrações de nutrientes compreendidos entre janeiro e março (LAVIOLA *et al.*, 2007).

Dentre os atributos biológicos, vários indicadores também têm sido propostos na avaliação da qualidade do solo, entre os quais podem ser citados CBM, RBM, qCO₂ e atividades enzimáticas como β -glicosidase, urease, arilsulfatase, fosfatase, hidrólise de diacetato de fluoresceína, devido à alta sensibilidade e elevado potencial de diagnóstico desses indicadores nos sistemas agrícolas (ARAGÃO *et al.*, 2020a; MENDES *et al.*, 2021). Desses atributos biológicos, neste estudo, especificamente, o CBM e as atividades enzimáticas β -glucosidase, urease e arilsulfatase foram capazes de discriminar e separar os talhões de menor e maior produtividade na época seca, embora essa separação não tenha ocorrido na estação úmida.

Neste trabalho, durante a estação seca, o CBM foi um atributo que exibiu alto poder de segregação entre os talhões de maior e menor produtividade. Esses resultados estão de acordo com o observado por Aragão *et al.*, (2020) sobre sistemas de café convencionais no Cerrado mineiro durante a estação seca. Naves *et al.*, (2020) também relataram essa relação ao avaliar doses crescentes de gesso, observando maiores valores de CBM e produtividade no cultivo de café em duas estações climáticas no Cerrado. De forma semelhante, Romero *et al.*, (2023) identificaram uma correlação positiva entre CBM e produtividade ao estudar consórcios e sombreamento em cafezais durante a estação seca, atribuindo esse efeito ao manejo adotado nesses sistemas.

O CBM é influenciado pelo aporte de biomassa na superfície do solo, cuja incorporação estimula a atividade microbiana (LEPCHA; DEVI, 2020; SHU *et al.*, 2022) e sua decomposição, atuando como efeito *primer* (KUZYAKOV *et al.*, 2000), disponibilizando fontes de energia e nutrientes para os processos metabólicos (DIJKSTRA *et al.*, 2009). De modo geral, na cafeicultura, as principais fontes e aportes correspondem à biomassa na forma de resíduos vegetais próprios da

cultura, como folhas, material reprodutivo, galhos, cascas, raízes, exsudados radiculares da cultura (SILVA *et al.*, 2002; BASTOS *et al.*, 2023). Além dos aportes da vegetação espontânea associada à cultura e resíduos orgânicos, na forma de composto (RICCI *et al.*, 2010; SÁNCHEZ *et al.*, 2023).

A adoção de algumas práticas pode favorecer o CBM. Estudos comparando sistemas de produção de café orgânico com sistemas convencionais mostram que o indicador CBM apresenta valores maiores nos sistemas mais conservacionistas (PARTELLI *et al.*, 2012; JUNIOR *et al.*, 2017). Embora este estudo demonstre a eficácia do CBM como indicador da qualidade do solo e da produtividade da cafeicultura, não temos dados em nossos resultados para estabelecer uma relação de causa e efeito entre o CBM e maior produtividade, considerando que os talhões de café seguiram práticas de manejo convencionais semelhantes. No entanto, é possível que diferenças de manejo ou de histórico das áreas não relatadas pelos produtores sejam responsáveis por essa variação na produtividade e na qualidade do solo.

Neste estudo, o indicador CBM na estação seca apresentou comportamento semelhante aos atributos da fertilidade, sendo maior nos talhões com maior produtividade (Figura 5a e 6a). Esse comportamento foi observado na cultura do café no estado do Rio de Janeiro, os maiores valores de CBM se correlacionaram com maiores teores de nutrientes no solo, atribuídos às práticas de calagem e fertilização (PIMENTEL *et al.*, 2011). Essas práticas também fornecem nutrientes para a biomassa microbiana, promovendo sua proliferação, ao permitir maior disponibilidade de nutrientes para os microrganismos do solo (SILVA *et al.*, 2002). A disparidade nos valores do indicador CBM entre a estação seca e a estação úmida é atribuída às mudanças sazonais (Gráfico 3a). Essas mudanças afetam principalmente a umidade e a temperatura do solo, o que é suficiente para afetar o metabolismo e a proliferação dos microrganismos no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A respiração basal microbiana (RESP) não se mostrou como um bom indicador, pois não apresentou associação com a produtividade, sugerindo baixa sensibilidade para representar o estado real do sistema nas condições avaliadas (Figura 3b). Resultados semelhantes foram relatados por Aragão *et al.*, (2020a), que atribuíram essa limitação ao aumento do CBM, decorrente da elevação de compostos orgânicos no solo ou da maior atividade microbiana sob condições de estresse. Assim, a interpretação da RESP como indicador da atividade microbiana deve ser feita com cautela,

devido à ambiguidade na sua análise e ao risco de conclusões equivocadas (NAVES *et al.*, 2020; SÁNCHEZ *et al.*, 2023).

Em relação ao quociente metabólico (qCO_2), os resultados foram contrastantes na estação seca, mas apresentaram associação com os talhões de menor produtividade na estação chuvosa (Figura 3c). Neste estudo, os valores registrados foram inferiores a $2,0 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBM dia}^{-1}$, faixa descrita em áreas agrícolas (ANDERSON, 2003; PAOLINI, 2018) e na cafeicultura de Minas Gerais e Bahia (ARAGÃO *et al.*, 2020; BASTOS *et al.*, 2023; MELLONI *et al.*, 2013). Valores elevados de qCO_2 indicam maiores custos energéticos para a manutenção microbiana, possivelmente devido a variações no suprimento de energia ou outras condições adversas (; MELLONI *et al.*, 2013; PAOLINI, 2018; PIMENTEL *et al.*, 2011). Assim, o qCO_2 mostrou-se um indicador eficiente para diferenciar os talhões por produtividade e útil no monitoramento da qualidade do solo na cafeicultura. Esses resultados são semelhantes aos de Aragão *et al.*, (2020a), que associaram valores elevados de qCO_2 a talhões de menor produtividade, indicando um ambiente menos favorável ao desenvolvimento microbiológico.

4.2. Atividades enzimáticas dos dez talhões de café

As atividades enzimáticas do solo têm sido sugeridas como indicadores potenciais nas análises de solo, devido à sua sensibilidade às mudanças ambientais que refletem a qualidade e a fertilidade do solo, sendo mediadoras diretas do catabolismo biológico dos componentes orgânicos (ARAGÃO *et al.*, 2020; MENDES *et al.*, 2021; RAO *et al.*, 2017). Entre essas atividades, a β -glicosidase governa o processo de degradação de polissacáridos, especificamente nos enlaces glicosídicos, como em substratos de celobiose para formação de glicose contribuindo para a manutenção do sistema solo (VARMA; SHUKLA, 2011). Entre as enzimas comumente utilizadas como indicadores biológicos, a β -glicosidase é a que frequentemente apresenta maiores relações com a qualidade de solo e a produtividade (ARAGÃO *et al.*, 2020a; MENDES *et al.*, 2021).

Neste estudo na estação seca, a enzima β -glicosidase geralmente exibiu maior atividade nos talhões de maior produtividade (Figura 4a). Isto pode ser devido ao fato de que os produtos da hidrólise promovida por esta enzima são fontes de energia importantes para os processos metabólicos dos microrganismos (EIVAZI; TABATABAI, 1988) e, simultaneamente, resulta na liberação de nutrientes para as culturas, potencialmente contribuindo para a obtenção de maiores

produtividades (ARAGÃO *et al.*, 2020a; VANEGAS, ZAMBRANO, AVELLANEDA, 2018;). Por outro lado, com base em nossos resultados, não é possível descartar outros mecanismos que explicariam as respostas observadas. Portanto, sugerimos que é possível que a direção dos efeitos ocorra das plantas para os microrganismos, ou seja, que nas áreas de maior produtividade, as plantas de maior vigor promovam maior exsudação radicular, o que, por sua vez, estimula a atividade microbiana e, conseqüentemente, a atividade da β -glicosidase. Finalmente, um terceiro mecanismo que poderia explicar os resultados observados seria a influência de fatores externos não controlados neste estudo, como regime hídrico, textura e densidade do solo, que podem afetar igualmente a produtividade e a atividade da β -glicosidase (RODRIGUES *et al.*, 2021). Em qualquer caso, a determinação específica do mecanismo responsável pela associação entre β -glicosidase e produtividade não é essencial para sua utilização como indicador biológico.

Na estação úmida, a β -glicosidase não apresentou o mesmo poder de discriminação da produtividade observado na estação seca (Figura 4a). Resultados similares foram reportados por Aragão *et al.*, (2020a), que indicaram sua eficácia como indicador apenas na estação seca. O aumento da umidade pode afetar as concentrações de substrato e da enzima no solo, alterando a afinidade do complexo enzima-substrato e reduzindo sua sensibilidade como indicador Zhang *et al.*, (2011) e Li *et al.*, (2024) também observaram, em uma meta-análise, que o aumento da precipitação reduz a proporção enzimática C:N, sem impactos significativos sob menor precipitação. Além disso, a umidade elevada pode criar um ambiente mais favorável à atividade microbiana, mascarando diferenças reais na qualidade do solo e tornando essas variações mais perceptíveis em períodos de maior limitação hídrica, como na estação seca. Assim, nossos resultados reforçam que a β -glicosidase é um indicador bioquímico útil na avaliação da qualidade do solo na cafeicultura, mas sua aplicação como discriminador da produtividade é mais confiável na estação seca

A urease desempenha um papel fundamental na agricultura ao catalisar a hidrólise da ureia (KRAJEWSKA, 2009; PACHECO; COLLA, 2019). Esse atributo é frequentemente utilizado como indicador da qualidade do solo e está associado à produtividade (ARAGÃO *et al.*, 2020a; GIL-SOTRES *et al.*, 2005). No presente estudo, sua atividade permitiu discriminar os talhões de maior produtividade em ambas as estações, com valores geralmente superiores nesses talhões, resultado também observado por Aragão *et al.*, (2020a) e Naves *et al.*, (2020) em cultivos de café

em Minas Gerais. Embora os valores tenham se mantido semelhantes entre as estações, a atividade e o poder de discriminação foram mais evidentes no período de maior precipitação (LI *et al.*, 2024).

A cafeicultura convencional é altamente dependente de fertilizantes, especialmente nitrogenados, com recomendações de aplicação variando entre 80 e 450 kg ha⁻¹ de N, sendo a ureia a principal fonte (GUIMARÃES *et al.*, 1999). Esse suprimento atua como substrato para a síntese e secreção da urease pelos microrganismos do solo. No entanto, a adição de NH₄⁺ pode reduzir essa atividade, pois o produto final da reação enzimática diminui a necessidade de gasto energético microbiano para a assimilação do nutriente (BANDICK; DICK, 1999; VARMA; SHUKLA, 2011). Estudos indicam que talhões com maior atividade de urease tendem a apresentar solos mais férteis, possivelmente devido à maior retenção de nutrientes e aplicação de fertilizantes (ARAGÃO *et al.*, 2020a). Em nosso estudo, a aplicação de adubo foi semelhante entre os talhões de maior e menor produtividade, sugerindo que solos com maior equilíbrio físico, químico e biológico oferecem condições mais favoráveis ao desenvolvimento das culturas e da microbiota, reduzindo perdas por lixiviação e erosão e refletindo em maior produtividade.

A atividade da urease na estação úmida mostrou maior capacidade de discriminação em relação à produtividade do que na estação seca (Figura 4b), possivelmente devido ao aumento da precipitação, temperatura e pH, fatores que favorecem sua atividade durante a transição entre as estações (VANEGAS; ZAMBRANO; AVELLANEDA, 2018; LI *et al.*, 2024). A umidade afeta a difusão da enzima e do substrato, influenciando as concentrações efetivas dos reagentes da hidrólise da ureia (VARMA; SHUKLA, 2011). Além disso, elevações na temperatura podem acelerar a atividade da urease, aumentando a mineralização líquida de N e, consequentemente, a produtividade das plantas (RUSTAD *et al.*, 2001). O pH do solo, alterado pela aplicação de calcário, também influencia a atividade da enzima, sendo sua faixa ideal entre 8,5 e 9,0 (TABATABAI; BREMNER, 1972). Assim, a atividade da urease, ao demonstrar capacidade consistente de segregação da produtividade do cafeeiro independentemente da estação, reforça seu potencial como indicador de qualidade do solo em áreas cafeeiras.

A arilsulfatase é responsável pela hidrólise de ésteres de sulfato orgânicos no solo (TABATABAI, 1994). Na estação seca, sua atividade apresentou um padrão consistente de associação com a produtividade. Em quatro dos cinco pares de talhões estudados, a atividade média da arilsulfatase foi maior nos talhões de maior produtividade, embora a diferença tenha sido

estatisticamente significativa em apenas um talhão. As análises multivariadas de PCA confirmaram essa associação com maiores produtividades na estação seca (Figura 5c). No entanto, na estação úmida, essa relação não foi observada no mesmo nível. Diferentemente, Aragão *et al.*, (2020a) encontraram associação da atividade da arilsulfatase com os talhões de maior produtividade apenas na estação úmida em cafeeiros do Cerrado. A associação observada exclusivamente na estação seca sugere que, sob condições desfavoráveis do solo, algum fator não determinado pode limitar a atividade microbiana, diferenciando solos de menor e maior qualidade e, consequentemente, sua produtividade. Já na estação úmida, condições mais favoráveis podem mascarar essa diferença. Assim, a atividade da arilsulfatase deve ser considerada um indicador da qualidade do solo em cafezais, especialmente na estação seca, apresentando um padrão de segregação da produtividade semelhante ao da β -glicosidase.

A atividade hidrolítica microbiana, avaliada pela liberação de fluoresceína (SCHNURER; ROSSWALL, 1982), não se mostrou um bioindicador confiável para a qualidade do solo e sua associação com a produtividade, devido à inconsistência dos resultados, apesar da discriminação estatística em alguns talhões (Figura 4d). Esse comportamento também foi relatado por Aragão *et al.*, (2020a) na cultura do café e por Melloni *et al.*, (2013) em estudos sobre manejo de plantas daninhas em Minas Gerais. De forma semelhante, a fosfatase ácida, enzima envolvida na mineralização de compostos orgânicos contendo P (BANERJEE; SANYAL; SEN, 2012), apresentou baixa sensibilidade, sem associação consistente com a produtividade dos cultivos (Figura 4e). A influência da calagem e da disponibilidade de fósforo lábil em sistemas convencionais de cafeicultura pode estimular a biossíntese dessa enzima de forma homogênea entre os talhões, reduzindo sua eficácia como bioindicador (ACOSTA-MARTINEZ; TABATABAI, 2000; PAZ-FERREIRO; FU, 2013; VANEGAS; ZAMBRANO; AVELLANEDA, 2018). Assim, tanto a atividade da FDA quanto a fosfatase ácida demonstraram baixo potencial como indicadores de qualidade do solo na cafeicultura.

Durante o período seco, alguns indicadores microbiológicos apresentaram maior atividade nos talhões de maior produtividade, possivelmente refletindo a melhor qualidade do solo. Solos de maior qualidade são capazes de sustentar a atividade microbiológica mesmo sob condições de estresse biótico ou abiótico, o que favorece o desenvolvimento radicular, a ciclagem de nutrientes e, consequentemente, o aumento da produtividade. Assim, o cultivo do café na estação seca não

seria tão prejudicado quanto em solos menos resilientes, que não conseguem amortecer os efeitos adversos do clima, impactando negativamente a produtividade.

5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo confirmam que os parâmetros microbiológicos do solo são eficazes na avaliação da qualidade do solo na cultura do cafeeiro, pois refletem a produtividade da cultura. Dentre os atributos microbiológicos analisados, o carbono da biomassa microbiana e as atividades das enzimas β -glicosidase, urease e arilsulfatase demonstraram maior capacidade de discriminação do potencial produtivo dos talhões de café sob condições heterogêneas. No entanto, esse efeito foi observado predominantemente na estação seca, com exceção da urease, que também se mostrou um indicador confiável na estação chuvosa. O quociente metabólico, por sua vez, esteve associado às menores produtividades na estação chuvosa. Entre os atributos físicos e químicos avaliados, o pH e a saturação por bases (V%) foram os que melhor indicaram as maiores produtividades, embora apenas na estação seca.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; TABATABAI, M. A. Enzyme activities in a limed agricultural soil. **Biology and Fertility of Soils**, [S. l.], v. 31, n. 1, p. 85–91, 2000
- ALEF, Kassem; NANNIPIERI, Paolo. Estimation of microbial activities. [S.l.]: **Academic Press**, 1995.
- ALVARES, C. A. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDERSON, T. H. Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 98, n. 1–3, p. 285–293, 2003.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. 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**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993.
- ARAGÃO, O. O. S. et al. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 113, p. 106205, 2020a
- ARAGÃO, O. O. S. et al. The Effectiveness of a Microbiological Attribute as a Soil Quality Indicator Depends on the Storage Time of the Sample. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [S. l.], 2020b.
- BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. [S. l.], v. 31, 1999.
- BANERJEE, A. SANYAL, S. SEN, S. Soil phosphatase activity of agricultural land: A possible index of soil fertility. **Agricultural Science Research Journals**, [S. l.], v. 2, n. 7, p. 412–419, 2012.
- BASTOS, R. S. T. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **CATENA**, [S. l.], v. 230, p. 107270, 2023
- BROOKES, P. C. et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 17, n. 6, p. 837–842, 1985.
- CLIMATE-DATA.ORG. Datos climáticos mundiales - Climate-Data.org. 2021. Disponível em: <https://es.climate-data.org/>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. 1o Levantamento de Café - Safra 2024. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe/item/22623-1-levantamento-de-cafe-safra-2024>
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. 2o Levantamento de Café - Safra 2023. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe/item/20652-2-levantamento-de-cafe-safra-2023>. Acesso em: 28 jun. 2023.

- DE SOUZA, T. L. et al. Nitrogen fertilizer technologies: Opportunities to improve nutrient use efficiency towards sustainable coffee production systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S. l.], v. 345, p. 108317, 2023
- DIACK, M. Relationships between soil biological and chemical characteristics and surface soil structural properties for use in soil quality. Purdue University Doctoral dissertation. 1997.
- DICK, R. P. BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: *Methods for Assessing Soil Quality*. [s.l.]: 1996, 1996. p. 247–271.
- DIJKSTRA, F. A. et al Does accelerated soil organic matter decomposition in the presence of plants increase plant N availability? **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 41, n. 6, p. 1080–1087, 2009.
- DORAN, J. W; PARKIN T. B. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, [S. l.], v. 35, n. **SSSA Special Publication**, p. 3–21, 1994.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 20, n. 5, p. 601–606, 1988.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAOSTAT. 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 11 jul. 2023.
- GIL-SOTRES, F.; et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 37, n. 5, p. 877–887, 2005.
- GUIMARÃES, N. F.; et al. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 34–44, 2017.
- GUIMARÃES, P.T.G. et al. (Ed.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª Aproximação Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG*, 1999. p.289-302.
- HOEFT, R.G., WALSH, L.M., KENNEY, D.R. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 37, 401–411, 1973.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?edicao=36203>. 2023.
- JUNIOR, R. R. A.; et al. Chemical and microbiological soil properties in organic and conventional management systems of *Coffea arabica* L. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 40, n. 14, p. 2076–2086, 2017.
- KRAJEWSKA, B. Enzymatic Ureases I. Functional, catalytic and kinetic properties: A review. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, [S. l.], v. 59, p. 9–21, 2009.
- KUZYAKOV, Y.; FRIEDEL, J. K.; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 32, n. 11–12, p. 1485–1498, 2000.
- LAVIOLA, B. G.; et al. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: cálcio, magnésio e enxofre. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 31, n. 6, p. 1451–

1462, 2007.

LEPCHA, N. T., & Devi, N. B. Effect of land use, season, and soil depth on soil microbial biomass carbon of Eastern Himalayas. **Ecological Processes**, v. 9(1), 65. 2020.

LI, J.; et al. Soil enzyme activity and stoichiometry in response to precipitation changes in terrestrial ecosystems. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 191, p. 109321, 2024.

MCLEAN, E.O., et al., Aluminum in soils: I. extraction methods and magnitudes in Ohio clays and soils 1. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 22, 382. 1958.

MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄. North Carolina Soil Testing Division, Raleigh. 1953

MELLONI, R.; et al. Métodos de controle de plantas daninhas e seus impactos na qualidade microbiana de solo sob cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 37, n. 1, p. 66–75, 2013. 2023.

MENDES, I. C.; et al. Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Documentos **Embrapa**, [S. l.], v. 369, p. 1–50, 2021.

MESQUITA, C.M., 2016. Manual do café: manejo dos cafezais em produção (Coffee manual: management of coffee production). **EMATER-MG**. 72.

MOREIRA, F. M. de S; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. **Editora UFLA**, [S. l.], p. 407–447, 2006.

NAVES, A. P.; et al. Biochemical parameters of an oxisol submitted to high doses of gypsum in the coffee culture. **Coffee Science**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 1–9, 2020.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION - Trade Statistics Tables. 2021. Disponível em: https://www.ico.org/trade_statistics.asp. Acesso em: 28 ago. 2023.

PACHECO, V. L.; COLLA, L. M. A enzima urease e suas aplicações na agricultura e engenharia. **Revista CIATEC –UPF**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 1–21, 2019.

PAOLINI, J. E. G. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. **Revista Terra Latinoamericana**, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 13, 2018.

PARTELLI, F. L.; et al. Chemical and Microbiological Soil Characteristics under Conventional and Organic Coffee Production Systems. Communications in **Soil Science and Plant Analysis**, [S. l.], v. 43, n. 5, p. 847–864, 2012.

PAZ-FERREIRO, J.; FU, S. Biological Indices for Soil Quality Evaluation: Perspectives and Limitations. **Land Degradation & Development**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 14–25, 2013.

PIAO, R. S; et al. The adoption of Voluntary Sustainability Standards (VSS) and value chain upgrading in the Brazilian coffee production context. **Journal of Rural Studies**, [S. l.], v. 71, p. 13–22, 2019

PIMENTEL, M. S., et al. Bioindicators of soil quality in coffee organic cultivation systems. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [S. l.], v. 46, n. 5, p. 545–552, 2011.

RAO, C. S., et al. Soil Enzymes. Encyclopedia of Soil Science, Third Edition, [S. l.], n. November,

p. 2100–2107, 2017.

RICCI, M. S. F. et al. Produção de biomassa e acúmulo de nutrientes pela vegetação espontânea em cultivo de café orgânico. **Coffee Science**, [S. l.], v. 5, n. 1, 2010.

RODRIGUES, R. N. et al. Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria. **Ciencia Rural**, [S. l.], v. 52, n. 3, p. 1–12, 2021.

ROMERO F., et al. The coffee-mango association promotes favorable soil conditions for better-nourished and higher-yielding plants. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S. l.], v. 354, p. 108589, 2023.

RUSTAD, L. E. et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. **Oecologia**, [S. l.], v. 126, n. 4, p. 543–562, 2001.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [S. l.], v. 56, n. 2, p. 195–212, 2018.

SÁNCHEZ, R. A. D., et al. The Application of Coffee Pulp Biochar Improves the Physical, Chemical, and Biological Characteristics of Soil for Coffee Cultivation. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 2512–2524, 2023.

SANTOS, H. G. dos. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018

SCHNURER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein Diacetate Hydrolysis as a Measure of Total Microbial Activity in Soil and Litter. **Applied and Environmental Microbiology**, [S. l.], v. 43, n. 6, p. 1256, 1982. b.

SHOEMAKER, H.E., MCLEAN, E.O., PRATT, P.F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Sci. Soc.Am. Proc.** 25, 274–277. 1961.

SHU, X., et al. Applying cover crop residues as diverse mixtures increases initial microbial assimilation of crop residue-derived carbon. **European Journal of Soil Science**, 73(2), 2022.

SILVA, F. A. M., et al. Molecular Na Rizosfera De Cafeeiro Por Low Molecular Weight Organic Acid Determinations in the Rizosphere of Coffee Tree Plants By High Performance Liquid Chromatography. **Ciência e Agrotecnologia**, [S. l.], p. 1391–1395, 2002.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes Chapter 37. [S. l.], n. 5, p. 775–833, 1994.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Assay of urease activity in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 479–487, 1972.

TEIXEIRA, Paulo César. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Embrapa ed. Brasília, DF. 2017

TEIXEIRA, H M., et al. Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. **Agriculture**,

Ecosystems & Environment, [S. l.], v. 305, p. 107171, 2021.

UNITED NATIONS. Población | Naciones Unidas. 2023. Disponível em: <https://www.un.org/es/global-issues/population>. Acesso em: 11 jul. 2023.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

VANEGAS, Johana Juliet Caballero; ZAMBRANO, Karen Bibiana Mejía; AVELLANEDA-TORRES, Lizeth Manuela. Effect of ecological and conventional managements on soil enzymatic activities in coffee agroecosystems. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, [S. l.], v. 48, n. 4, p. 420–428, 2018.

VARMA, Ajit; SHUKLA, Girish. *Soil Biology*. [s.l: s.n.]. v. 22

WALKLEY, A., BLACK, I.A., An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.** 37, 29–38. 1934.

ZHANG, Y., et al. Kinetic parameters of soil β -glucosidase response to environmental temperature and moisture regimes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 35, n. 4, p. 1285–1291, 2011.

CAPÍTULO 3

ARTIGO 2: INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO ASSOCIADOS COM OS SISTEMAS DE MANEJO DO CAFEIEIRO EM ÁREAS DO DOMÍNIO CERRADO DE MINAS GERAIS.

RESUMO

No bioma Cerrado coexiste grande parte da atividade agrícola do Brasil, e o sistema de produção de café representa um segmento importante dessa agricultura. Minas Gerais por ser o principal e maior produtor de café do país sob sistema de produção convencional, vem incorporando práticas que fazem o modelo de produção transitar para modelos de produção mais conservacionistas. Nesse sentido, compreender a influência dos sistemas de produção agrícola sobre a qualidade do solo com o uso indicadores microbiológicos, é importante para avançar no diagnóstico e no manejo sustentável do solo e da cafeicultura. Sendo assim, objetivou-se avaliar o efeito dos sistemas de produção de café (convencional, regenerativo) e sistema floresta nativa característica do bioma Cerrado, sobre os indicadores microbiológicos do solo no município de Patrocínio, Minas Gerais. Portanto, foram utilizadas amostras de solo coletadas, em 7 propriedades. As amostras foram coletadas na estação seca, (2022) e na estação úmida, (2023), agrupadas em 3 áreas. Na primeira área, foram selecionados um par de talhões de café sob modelo de produção convencional, um par de talhões de café sob modelo regenerativo e um par de talhões de floresta nativa. As áreas 2 e 3 seguem o mesmo desenho de amostragem. O procedimento experimental consistiu na delimitação de um transecto de 200 m de comprimento em cada talhão, sendo coletada uma amostra composta a cada 50 m na profundidade de 0-10 cm, totalizando cinco amostras compostas por transecto. Além dos atributos físicos e químicos de rotina: textura, pH, matéria orgânica e nutrientes do solo, os seguintes atributos microbiológicos foram avaliados; carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal microbiana (RESP), quociente metabólico (qCO_2), atividades das enzimas β -glicosidase, urease, arilsulfatase, fosfatase ácida e hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA). Os atributos microbiológicos foram modificados pelos sistemas de manejo, sendo estes favorecidos no gradiente, florestal nativa, sistema regenerativo e, sistema convencional, independente da estação avaliada. Entre os sistemas de manejo do cafeeiro, os atributos CBM, RESP, arilsulfatase, β -glucosidase, FDA e, Fosfatase ácida, atendem a uma maior condição de resposta na estação úmida.

PALAVRAS- CHAVE: Bioindicadores. *Coffea arabica* L. Saúde do solo. Sustentabilidades.

ABSTRACT

The Cerrado biome is home to a large part of Brazil's agricultural activity, and the coffee production system represents an important segment of this agriculture. Minas Gerais, as the country's main and largest coffee producer under a conventional production system, has been incorporating practices that make the production model transition to more conservationist production models. In this sense, understanding the influence of agricultural production systems on soil quality using microbiological indicators is important to advance the diagnosis and sustainable management of soil and coffee growing. Therefore, the objective was to evaluate the effect of coffee production systems (conventional, regenerative) and native forest systems characteristic of the Cerrado biome, on soil microbiological indicators in the municipality of Patrocinio, Minas Gerais. Therefore, soil samples collected from 7 properties were used. Samples were collected in the dry season (2022) and in the wet season (2023), grouped into 3 areas. In the first area, a pair of coffee plots under a conventional production model, a pair of coffee plots under a regenerative model and a pair of native forest plots were selected. Areas 2 and 3 follow the same sampling design. The experimental procedure consisted of delimiting a 200 m long transect in each plot, with a composite sample collected every 50 m at a depth of 0-10 cm, totaling five composite samples per transect. In addition to routine physical and chemical attributes: texture, pH, organic matter and soil nutrients, the following microbiological attributes were evaluated; microbial biomass carbon (MBC), microbial basal respiration (RESP), metabolic quotient (qCO_2), activities of the enzymes β -glucosidase, urease, arylsulfatase, acid phosphatase and fluorescein diacetate hydrolysis (FDA). The microbiological attributes were modified by the management systems, which were favored in the gradient, native forest, regenerative system and conventional system, regardless of the season evaluated. Among the coffee management systems, the attributes CBM, RESP, arylsulfatase, β -glucosidase, FDA and acid phosphatase meet a greater response condition in the wet season.

KEYWORDS: Bioindicators. *Coffea arabica* L. Soil health. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

O cultivo do café é um dos setores importantes da economia agrícola mundial devido à sua demanda global, e por proporcionar renda para milhões de produtores em todo o mundo. No Brasil, o cultivo do café ocupa 2,2 milhões de hectares, com uma produção média anual em torno de 55 milhões de sacas de 60 kg, gerando receitas superiores a oito bilhões de dólares, de acordo com a safra 2022/23 (IBGE, 2023). Este setor responde a um sistema de produção caracterizado principalmente pela prática de um modelo produtivo de monocultura, enquadrado dentro da agricultura convencional (DUTRA; DE SOUZA, 2017), que se caracteriza pelo uso intensivo dos recursos naturais, orientado para alcançar alta produtividade. Atualmente, o cultivo cafeeiro enfrenta o desafio de se direcionar à sustentabilidade para um uso eficiente e racional da terra (ARRUDA *et al.*, 2020).

No estado de Minas Gerais, o cultivo de café ocupa uma área importante, superior a 1,17 milhão de hectares, correspondendo a 53% da colheita de 2023/24, se destacando como o maior produtor de café do Brasil. Seu sucesso se baseia na oferta ambiental e no apoio de programas governamentais, que permitiram ampliar a fronteira agrícola em regiões como o Cerrado Mineiro, convertendo a região na maior concentração de áreas sob cafeicultura técnica do Brasil. Por outro lado, ainda é limitada a informação atual sobre a qualidade do solo e o efeito que a introdução da cafeicultura e seus modelos de produção geram nos componentes do sistema edáfico, pois entender sua dinâmica é fundamental para a produção de alimentos e para a manutenção da qualidade ambiental (PENA; MARQUES; LASCHEFSKI, 2022; ZHAO *et al.*, 2018).

Nos modelos agrícolas produtivos de cafeeiro, destacam-se a agricultura convencional e a regenerativa. Estes baseiam suas gestões em diferentes enfoques e princípios que variam desde o uso intensivo de insumos externos, associada a práticas de mecanização com implementação de monoculturas (DUTRA; DE SOUZA, 2017), até a transição com redução de algumas práticas e incorporação de manejos que envolvam os ciclos naturais, biodiversidade e promovam a saúde do solo, além da conservação e restauração do ecossistema (ALTIERI, 2002; FIGUEIREDO; GOMES; CARRERO, 2016; GUIMARÃES *et al.*, 2017;; KIM *et al.*, 2020). Dessa forma, é importante avaliar o efeito de cada modelo de produção do café, na qualidade do sistema do solo, para entender as condições que mantêm a produtividade biológica (DORAN; PARKIN, 1994; PERIS *et al.*, 2000).

Nesse sentido, para avaliar o efeito dos diferentes tipos de manejo, convencional e

regenerativo no solo, além do sistema florestal Cerrado nativo, necessariamente devem ser incluídos indicadores físicos, químicos e biológicos (BÜNEMANN *et al.*, 2018). Especificamente dentre os atributos biológicos, vários indicadores também têm sido propostos na avaliação da qualidade do solo, e incluindo ao carbono da biomassa microbiana (CBM) e, as atividades enzimáticas (ARAGÃO *et al.*, 2020a; VANEGAS; ZAMBRANO; AVELLANEDA, 2018), devido à sensibilidade e pelo potencial de diagnóstico nos sistemas agrícolas (MENDES *et al.*, 2021), como foi recentemente relatado em sistemas de produção de café convencional no município de Patrocínio, por Aragão *et al.*, (2020a), ao apresentar uma resposta consistente de relação dos atributos biológicos com produtividade do cafeeiro.

De acordo com o exposto, esses resultados destacam a relevância dos atributos microbiológicos como ferramenta para avaliar e monitorar a qualidade do solo e, a sustentabilidade de agroecossistemas no Cerrado. Por isso, é importante realizar estudos que abranjam modelos de produção de café, e áreas de floresta natural do bioma no estado de Minas Gerais (PIMENTEL *et al.*, 2011; ARAGÃO *et al.*, 2020). Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar a resposta dos atributos microbiológicos (carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana, quociente metabólico, atividade das enzimas β -glicosidase, arilsulfatase, urease, fosfatase e hidrólise de diacetato de fluoresceína), além dos atributos físicos e químicos do solo, sob os modelos de produção de café: convencional e regenerativo, junto as áreas naturais adjacentes sem intervenção antrópica.

Em resumo, este estudo fornece informações sobre a avaliação do efeito dos modelos de produção de café na qualidade do solo e caracteriza o estado de conservação da floresta nativa do bioma Cerrado. As hipóteses são: 1-O sistema de produção de café influencia a atividade dos indicadores microbiológicos de qualidade do solo, resultando em maiores valores de CBM e atividade enzimática, além de menores valores de qCO_2 no sistema regenerativo, enquanto no sistema convencional ocorre um desbalanço, caracterizado por maiores teores de nutrientes e menores valores de CBM e atividade enzimática. 2-Solos sob floresta nativa apresentam uma melhor qualidade do solo, que solos sob produção de café, e podem apresentar maiores valores de CBM e maiores valores de atividade enzimática (β -glicosidase, arilsulfatase, urease, fosfatase ácida e FDA). 3-O gradiente da qualidade do solo se estabelece da seguinte forma: sistema de produção café convencional, sistema de produção de café conservacionista e floresta nativa. 4-Os indicadores microbiológicos têm maior capacidade de discriminar os sistemas de manejo na estação seca em

comparação com a estação chuvosa.

2. MATERIAL E METODOS

2.1. Caracterização da região experimental

As amostras de solos foram coletadas nas propriedades de sete fazendas (Tabela 3) no município Patrocínio, localizadas na mesorregião do Alto do Paranaíba, na região do Cerrado, no estado de Minas Gerais, Brasil. Segundo Alvares *et al.*, (2013) o clima da região segundo a classificação de Köppen é do tipo Cwb (Clima subtropical de altitude), com inverno seco e verão quente e úmido (CLIMATE-DATA.ORG, 2024). As precipitações médias anuais ascendem a 1408 mm, e a temperatura média anual é 21.2 °C. O relevo é classificado majoritariamente como plano e ondulado em 90% e altitude média de 977 m acima do nível do mar (figura 7).



Figura 7. Localização do município de Patrocínio, estado de Minas Gerais, Brasil.

Tabela 3. Localização geográfica das fazendas produtoras de café no município de Patrocínio Minas Gerais.

Fazenda	Proprietário	Latitude	Longitude
São Bernardo	Luidgi Nascimento	-18,862385	-47,131525
São Paulo	Marcelo Montanari	-18,876161	-47,091955

5 Estrelas	Ricardo Bartholo	-18,770485	-46,937484
Pedro Rossi	Pedro Rossi	-18,786689	-46,954587
Serra Negra	Ricardo Bartholo	-18,828484	-46,929628
Chapada Borges	Pasuch Borges	-18,690047	-46,955155
Agro Nunes	Gabriel Nunes	-18,853015	-47,032099

Fonte: Autor.

Nas fazendas, foram pré-selecionados talhões que atendiam a premissa do tipo de manejo das áreas produtoras de café, especificamente sistemas de manejo convencional (C) e, sistema de manejo regenerativo (R), além da presença de floresta nativa (F). No caso de talhões sob manejo C, estes apresentavam práticas de cultivo e gestão agrícola predominantes na região, com uso intensivo de adubos minerais, métodos de controle de plantas daninhas mecanizado e com emprego de herbicidas, métodos de colheita mecanizada, além de uso alternativo de irrigação, configurando o que se acordou denominar de manejo convencional. Os talhões sob manejo R, implementam práticas de manejo na transição para conservacionistas, baseados em práticas sustentáveis que priorizam as técnicas como conservação de solo, uso de fertilizantes orgânicos e minerais, aportes de matéria orgânica, minimização do uso de agrotóxicos e manejo integrado de pragas, característico dos modelos que procuram equilibrar a produção agrícola com a proteção ambiental. Por último, o sistema F, Cerradão que corresponde a área natural do bioma, de alto valor de conservação e, que não apresenta intervenção de tipo antrópica (Tabela 4). Além da identificação e pré-seleção dos sistemas de manejo C e R, foi possível padronizar a seleção dos talhões de cafeeiro para atender adicionalmente aos pré-requisitos da variedade, época de plantio, e tipo de solo Latossolo Vermelho (SANTOS *et al.*, 2018).

2.2. Amostragem de solo

As coletas de solos foram realizadas na estação seca (19 agosto, 8 e 27 de setembro do 2022) e na estação úmida (17 janeiro, 8 fevereiro e 7 de março do 2023). O plano de amostragem durante cada estação acatou às datas de coleta para garantir o processamento das amostras de solo no laboratório, seguindo uma ordem de prioridade para as análises de atributos microbiológicos, de acordo com o tempo de armazenamento em câmara fria no laboratório (ARAGÃO *et al.*, 2020b). Portanto, em cada data de coleta foi estabelecido a amostragem de dois talhões sob tipo de manejo

agrícola convencional (10 amostras) e um talhão de floresta nativa (5 amostras) próximo aos sistemas de café definido como C, dois de talhões de café sob tipo de manejo agrícola regenerativo (10 amostras) e um talhão de floresta nativa (5 amostras), próximo aos sistemas de café definido como R. Nas datas seguintes, inclusive na estação úmida, foi seguido o mesmo plano de amostragem descrito.

O plano de amostragem nos talhões de café e floresta nativa consistiu na definição do transectos de 200 m de comprimento no sentido da linha de plantio ou através da floresta nativa em linha reta, onde foram estabelecidos cinco pontos de amostragem, espaçados em 50 m (Figura 8). Em cada ponto foi coletada com uso de trado holandês, uma amostra de solo composta de cinco subamostras, sendo quatro das subamostras equidistantes ao ponto definido como o central, na profundidade de 0-10 cm, sob a projeção da copa da planta, especificamente por apresentar maior ocorrência do sistema radicular e atividade microbiana (Figura 9). As amostras foram rotuladas, dispostas em sacos plástico, levadas ao laboratório, peneiradas (2,0 mm) e armazenadas em câmara fria a uma temperatura de 4 °C antes do processamento e das análises de laboratório (ARAGÃO *et al.*, 2020b).

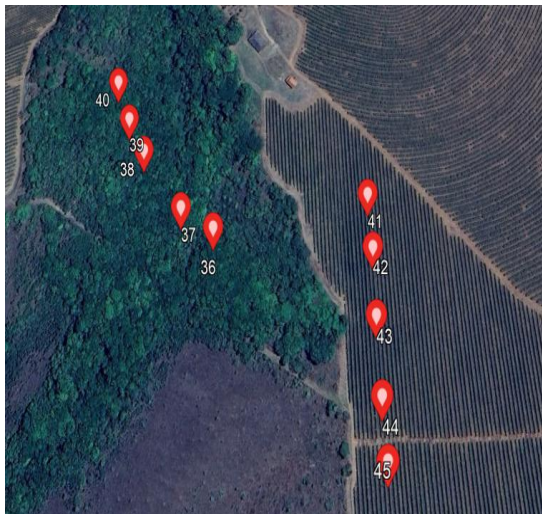


Figura 8. Desenho do transecto, 5 pontos de amostragem, equidistantes a cada 50 m para realizar coleta de solo, área de sistema de floresta nativa e sistema de produção de café, Fazendas 5 Estrelas, município de Patrocínio - MG. Fonte: Google Earth Pro (2023).



Figura 9. Procedimento de coleta de solo com uso do trado holandês, amostras simples de solo na projeção da copa das plantas, profundidade 10 cm, município de Patrocínio-MG. Fonte: Do autor

Tabela 4. Identificação das áreas, de acordo com os sistemas de manejo e variedades de café estabelecidas nas fazendas do município de Patrocínio, Minas Gerais.

Área	Fazenda	Sistema de Manejo	Variedade	ID
1	São Bernardo	Convencional com irrigação	Catuaí 144	C1
	São Bernardo	Convencional com irrigação	Topázio MG	C2
	São Bernardo	Nativa	Floresta	F-C1C2
	São Paulo	Regenerativo com irrigação	Catuaí 144	R1
	São Paulo	Regenerativo com irrigação	Topázio MG	R2
	São Paulo	Nativa	Floresta	FR1R2
2	Pedro Rossi	Convencional sem irrigação	Catuaí 62	C3
	Chapada Borges	Convencional com irrigação	IBC12	C4
	Pedro Rossi	Nativa	Floresta	F-C3C4
	Serra Negra	Regenerativo sem irrigação	Catuaí 62	R3
	5 estrelas	Regenerativo com irrigação	IBC12	R4
	5 Estrelas	Nativa	Floresta	F-R3R4
3	Agro Nunes	Convencional com irrigação	IBC12	C5
	Agro Nunes	Convencional com irrigação	Mundo Novo	C6
	Agro Nunes	Nativa	Floresta	F-C5C6
	Agro Nunes	Regenerativo com irrigação	Mundo Novo	R5
	Agro Nunes	Regenerativo com irrigação	IBC12	R6
	Agro Nunes	Nativa	Floresta	F-R5R6

Fonte: Autor.

2.3. Carbono da biomassa microbiana (CBM)

O teor de CMB foi estimado através do método de fumigação e extração, conforme descrito por Vance, Brookes e Jenkinson (1987). Amostras de 20 gramas de solo foram pesadas em placas de petri com seis repetições, três amostras não fumigadas e, três amostras fumigadas. As amostras fumigadas foram acondicionadas num dessecador contendo 40 mL de clorofórmio por um período de 24 horas, as amostras foram transferidas com uso de um funil para erlenmeyers de 125 mL. Na etapa de extração foram adicionados 50 mL de solução de K_2SO_4 (0,5 M) e submetidos a agitação por 30 minutos a 220 rpm. Continuo o filtrado do sobrenadante para a digestão de 8 mL do extrato, e foram adicionados 2 mL de $K_2Cr_2O_7$ e, 10 mL de H_2SO_4 (95%), e 5 mL de H_3PO_4 (85%) e foram dispostos sobre uma chapa por 5 minutos. Após é acrescentado 10 mL de água destilada depois do refreamento. Por titulação com sulfato ferroso amoniacal e difenilamina como indicador da

mudança da cor Azul para a cor verde garrafa é determinado o excesso de $K_2Cr_2O_7$. Os mesmos procedimentos foram aplicados às amostras de 3 brancos, mas em ausência de solo.

2.4. Respiração basal microbiana (RBM)

Para estimar o teor de dióxido de carbono (CO_2) após do processo de incubação, foi avaliado utilizando a metodologia proposta por Alef (1995). Em placas de petri por triplicata foram dispostas as amostras de 20 gramas de solo e, colocada no interior de recipientes de vidro, que tinham previamente um beaker com uma solução de 20 mL de NaOH (0,5 M), incubadas na escuridade por 72 horas. Após deste período, nos recipientes de vidro foi adição de $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ (0,5 M). Por titulação com HCl (0,5 M) e fenolftaleína (0,1%) como indicador da mudança da cor de vermelho para incolor. O branco segue similar procedimento, mas na ausência da amostra de solo.

2.5. Obtenção do Quociente Metabólico (qCO_2)

O quociente metabólico foi determinado a partir da razão entre respiração microbiana basal e carbono da biomassa microbiana. O resultado foi obtido em $\mu g.C-CO_2 \mu g^{-1} MBC \text{ dia}^{-1}$ de acordo com a proposta metodológica de Anderson e Domsch (1993).

2.6. Quantificação da atividade da β -glicosidase

A atividade das enzimas β -glicosidase foi estimada mediante o uso do método descrito por Dick *et al.*, (1996) baseado em colorimetria com substrato específico. Em elermeyers de 50 mL foi pesada e disposta um grama de solo, e adicionado 4,0 mL da solução universal modificada (MUB) a pH 6,0 e 1,0 mL da solução p-nitrofenil- β -D-glicosídeo (PNG), seguindo a etapa de incubação por 1 hora a 37°C. Após desse período, foi acrescentado 1,0 mL de $CaCl_2$ e 4,0 mL de uma solução de tris hidroximetil aminometano com pH 12. Posteriormente filtrada e no espectrofotômetro foi lida a liberação de p-nitrofenol (PNF) a 410 nm. O cálculo do conteúdo de PNF considera a diferença entre a densidade optica (D.O.) da amostra e controle, plotando no gráfico obtido da curva da solução padrão contendo 0, 10, 20, 30, 40 e 50 μg de PNF.

2.7. Quantificação da atividade da arilsulfatase

A determinação da atividade da arilsulfatase, usou-se o método por Dick *et al.*, (1996) que segue o princípio da colorimetria com substrato específico. Uma grama de solo é pesado em

erlenmeyer de vidro de 50 mL e após é adicionado 4,0 mL da solução de acetato e 1,0 mL da solução de p-nitrofenil sulfato (PNF). Seguindo o período de incubação por 1 hora a 37°C. Após de passado o período de incubação é interrompido a reação de atividade enzimática com a adição de 1,0 mL de CaCl_2 (0,5 M) e 4,0 mL de NaOH (0,5 M). O sobrenadante é filtrado e continua para a etapa da leitura no espectrofotômetro a 410 nm de comprimento onda. O controle seguiu o mesmo procedimento, com a única diferença de que o substrato foi adicionado somente após interromper a reação. O cálculo do conteúdo p-nitrofenol PNF foi pela diferença de densidade optica (D.O.) entre amostra e controle, plotando no gráfico obtido da curva da solução padrão contendo 0,10, 20, 30, 40 e 50 μg de PNF.

2.8. Quantificação da atividade de urease

A quantificação da atividade da urease foi baseada na metodologia de Tabatabai e Bremner (1972). Em erlenmeyer de 125 mL foram dispostos 5 g de solo, após foi acrescentado 9,0 mL de MUB pH 9,0 e 1,0 mL de uma solução com uréia (0,2 M) sendo agitadas, fechadas e incubada a 37°C por 2 horas. Após da incubação, foi adicionado uma solução de 35 mL de KCl (2M)- Ag_2SO_4 (100 ppm) para fechar a atividade. Do sobrenadante resultante 20 mL foram transferidos para tubos de vidro e adicionados 0,2 g de óxido de magnésio, e levado para o microdestilador, neste incluía 10 mL de NaOH (13N), o resultante foi coletado em erlenmeyer com solução de ácido bórico, contendo como indicadores bromocresol e vermelho de metila. A titulação é feita com H_2SO_4 (0,005 M). O controle seguiu o mesmo procedimento, com a única diferença de que a uréia foi adicionada somente após a adição da solução de KCl- Ag_2SO_4 .

2.9. Determinação da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA)

Para determinar a hidrólises do diacetato de fluoresceína (FDA), foi baseada na metodologia proposta por Green, Stott e Diack, (2006). Consistia em pesar um grama de solo em erlenmeyer de 125 mL, seguido da adição de 50 mL da solução tampão fosfato de sódio (60 mM), pH 7,6 e 0,5 mL de solução de substrato Diacetato de fluoresceína $\text{C}_{24}\text{H}_{16}\text{O}_7$ (4,8mM). Continuo o período de incubação a 35°C por um período de 3 horas. Passado esse período de tempo foi acrescentado 2,0 mL de acetona á suspensão para encerrar a hidrólise. Depois a suspensão foi transferida para a centrifuga, cinco minutos a 8000 rpm. Após desse período, seguiu a etapa de filtragem e leitura da absorbância dos brancos e amostras no espectrofotômetro a 490 nm para

quantificar a fluoresceína liberada. O controle seguiu o mesmo procedimento, com a única diferença de que o substrato foi adicionado somente após interromper a reação. O cálculo do conteúdo da atividade foi pela diferença de densidade ótica (D.O.) entre amostra e controle, contrastados com pontos que faziam parte da curva de calibração do produto fluoresceína.

2.10. Quantificação da atividade da fosfatase ácida

A mensuração da atividade da fosfatase é baseada na leitura no espectrofotômetro do *p*-nitrofenol resultante da atividade enzimática, conforme descrito por Dick *et al.*, (1996). Usado 1 g de solo em erlenmeyer de 50 mL é adicionados 4 ml de tampão (pH 6,5) e 1 mL de *p*-Nitrofenil fosfato, (pNPP) e levado à incubação a 37 °C durante 1 hora. Após do período de incubação é fechada a reação de atividade enzimática com 1 mL de CaCl₂ e 4 mL de NaOH. O processo de filtragem e leitura da absorbância no espectrofotômetro. O controle seguiu o mesmo procedimento, com a única diferença de que o substrato foi adicionado somente após interromper a reação. O cálculo da atividade foi pela diferença de densidade ótica (D.O.) entre controle e amostra contrastados com a curva de calibração do PNF (P-NITROFENOL).

2.11. Análises de atributos físico-químicos do solo

A caracterização dos atributos físico-químicos do solo nos talhões das fazendas selecionadas seguiu a conduta normalmente utilizada para as análises de rotina de fertilidade. Estes atributos incluíram pH medido em suspensão no solo e H₂O (1: 2,5); fósforo (P), potássio (K), zinco (Zn), manganês (Mn) e cobre (Cu), extraídos por solução de Mehlich-1 (MEHLICH, 1953); cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al), extraídos por KCl 1 mol L⁻¹ (MCLEAN *et al.*, 1958); acidez potencial (H + Al) pelo extrator SMP (SHOEMAKER; MCLEAN; PRATT, 1961); soma das bases trocáveis (SB); capacidade efetiva de troca catiônica (t); capacidade de troca catiônica potencial em pH 7,0 (T) calculadas; enxofre (S), extraído por fosfato monocálcico em ácido acético (HOEFT *et al.*, 1973); matéria orgânica (MO), por oxidação com dicromato de potássio em meio ácido (WALKLEY; BLACK, 1934); e textura, pelo método de Bouyoucos (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

2.12 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos a uma análise exploratória para identificar potenciais problemas. Os indicadores foram modelados por análise de variância usando modelos lineares generalizados (GLS). Os resíduos do modelo foram visualmente inspecionados para verificar as premissas (normalidade, homogeneidade dos resíduos padronizados e independência). Após o ajuste dos modelos, as médias dos sistemas C, R e F foram comparadas usando o teste Dunnett ($p < 0,05$). Além disso, foi realizada uma análise de componentes principais parcial (PCA), para determinar a relação entre as variáveis indicadoras de qualidade microbiológica de cada sistema. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software estatístico R, utilizando a interface R Studio versão 4.4.2.

3. RESULTADOS

3.1. Carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana e coeficiente metabólico

Os resultados desse estudo serão apresentados na forma de diferenças relativas % (Tabelas E, F e G), comparando o manejo regenerativo (R) ao manejo convencional (C), assim como o manejo R e C ao manejo floresta nativa (F), na forma de contrastes. Na estação seca, os valores médios do CBM foram significativamente maiores para os sistemas R nos contrastes R3-C3 (342,2 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo, 84,4 %) e R5-C5 (407,1 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo, 53,8 %) (Figura 10a). Na estação chuvosa, observou-se que os contrastes R2-C2, R3-C3, R5-C5, R6-C6, apresentaram aumentos significativos do CBM no manejo R com diferenças relativas do 62,6 %; 98,6 %; 58,8 %; e 27,4 % respectivamente (Figura 10a). Nos contrastes R-F e C-F para a estação seca e chuvosa o CBM foi significativamente menor nos manejos R e C para todas as áreas selecionadas, com diferenças relativas oscilando entre um 53%-85% na estação seca e entre 75%-53 na estação chuvosa, exibindo um padrão de resposta consistente em todos os contrastes, com similar direção do efeito, indicando valores menores quando comparados com o controle.

A respiração basal microbiana (RESP) nos contrastes R-C da estação seca, não exibiu diferenças estatísticas, com o manejo C apresentando valores médios entre 30,0-143,6 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , e o manejo R entre 30,7-159,8 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} (Figura 10b). Contrariamente, na estação chuvosa, os seis contrastes apresentaram diferenças estatísticas, a RESP foi maior sob o manejo R nos contrastes R1-C1 (106,9 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , 1,6 %), R2-C2 (109,8 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$

solo d^{-1} , 3,9 %), R3-C3 (147,8 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , 5,7 %), R5-C5 (73,4 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , 8,3 %), R6-C6 (59,8 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , 33,6 %), com exceção no contraste R4-C4, onde a RESP no manejo R resultou numa redução de 2,3% em comparação ao manejo C. Adicionalmente, no bioindicador RESP os sistemas de manejo C e R, quando contrastados com o sistema F, exibiram diferenças na estação seca quanto na estação chuvosa. A RESP foi consistentemente maior no sistema F nas duas estações com exceção do contraste C4-F e R3-F na estação seca. No entanto, nos contrastes C3-F, R3-F, C4-F, R4-F, C5-F da estação seca, e R3-F, C4-F da estação chuvosa as diferenças na RESP não foram estatisticamente significativas (Figura 10b).

O quociente metabólico (qCO_2) nos contrastes R-C da estação seca não apresentou diferenças significativas (Figura 10c). Para a estação chuvosa, os contrastes R4-C4 e R6-C6 apresentaram diferenças estatísticas, porém não seguiram um padrão na direção do efeito do sistema de manejo, ou seja, o qCO_2 para o manejo R foi menor 42,5% no contraste R4-C4 e maior num 338,8% no contraste R6-C6 em relação ao manejo C (Figura 10c). Para os contrastes R-F e C-F, o bioindicador qCO_2 na estação seca exibiu diferenças significativas em nove dos doze contrastes, em direção do efeito positivo, ou seja, o qCO_2 foi maior nos sistemas de manejo R e C quando comparados com F, com valores médios entre 0,1-1,4 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} e diferenças relativas entre 66,4%-429,7%. Na estação chuvosa, embora o qCO_2 foi consistentemente maior nos sistemas de manejo R e C (excetuando os contrastes C6-F e R6-F), somente nos contrastes C3-F (0,3 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , 73,1%), C4-F (0,5 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , 202,9%), R3-F (0,3 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , 85,1%), e R4-F (0,4 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , 142,2%) o qCO_2 aumentou significativamente. No contraste, C6-F (0,02 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo d^{-1} , 57,9%) o qCO_2 foi significativamente menor no manejo R em relação ao controle F (Figura 10c).

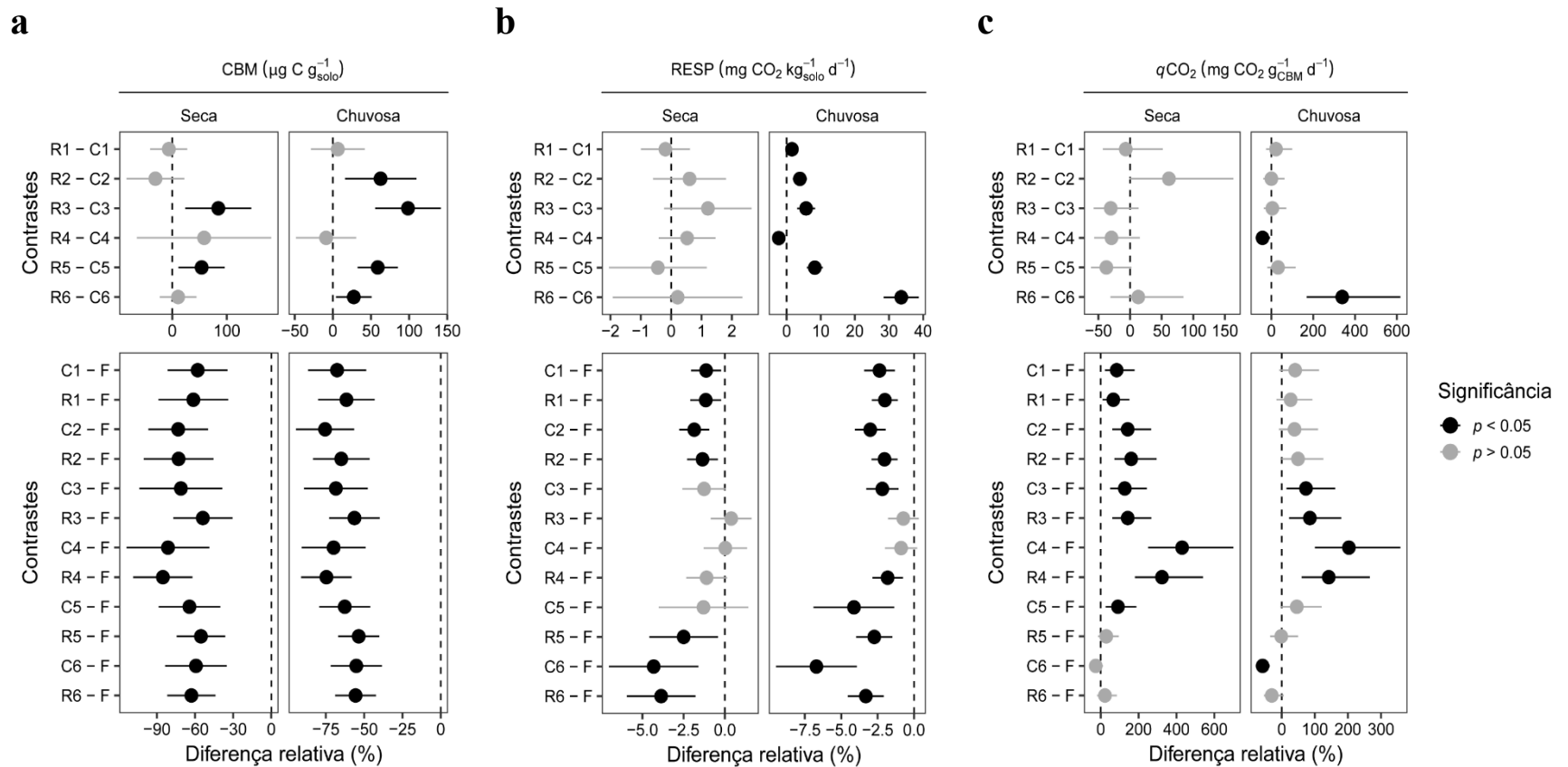


Figura 10. Gráfico de diferenças ou contrastes com intervalos de confiança.

(a) Carbono da biomassa microbiana (CBM), (b) Respiração basal do solo (RESP) e, (c) Quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) do solo em diferentes sistemas de manejo de café na estação seca (à esquerda) e chuvosa (à direita). O painel superior denota a direção e a magnitude das diferenças relativas (%) entre os sistemas de manejo regenerativo (R1-6) e convencional (C1-6). O painel inferior denota as diferenças relativas (%) entre cada sistema de manejo cafeeiro e sua floresta nativa adjacente pelo teste de Dunnett. As barras de erro denotam o intervalo de confiança de 95%.

3.2. Atividades enzimáticas no sistema de manejo de café convencional, regenerativo e floresta nativa

A atividade da enzima arilsulfatase (aril) nos contrastes R-C, foi maior no sistema de manejo R, com exceção do contraste R1-C1, para a estação seca (Figura 11). No entanto, observou-se somente aumentos significativos da aril nos contrastes R2-C2 ($118,6 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 6,1 %), R3-C3 ($385,0 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 8,9 %), R4-C4 ($302,6 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 1,7%), e R6-C6 ($105,1 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 11,6%) no manejo R em relação ao C (Figura 11a). Um comportamento similar foi detectado para a estação chuvosa, onde a atividade da enzima aril aumentou significativamente no manejo R em quatro dos seis contrastes, R3-C3 ($222,5 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 5,2%), R4-C4 ($213,4 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 1,8%), R5-C5 ($204,5 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 8,4 %), e R6-C6 ($145,9 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 6,3%) em relação ao C (Figura 11a). Nos contrastes R-F e C-F a atividade da aril, na estação seca quanto na estação chuvosa, foi significativamente maior nos sistemas de florestas nativas F, quando contrastados com os sistemas de manejo R e C, com valores médios entre $38,3\text{-}366,9 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$ e diferenças relativas entre 1,3%-2,9% para a estação seca, e $16,7\text{-}236,6 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$ e diferenças relativas entre 1,6%-3,0% para a estação chuvosa (Figura 11a).

Na atividade da enzima β -glicosidase (β -gli) para a estação seca, nos contrastes R-C, diferenças foram observadas só nos contrastes R1-C1, R2-C2 e R3-C3 (Figura 11b). No contraste R1-C1, a atividade β -gli foi significativamente menor no manejo R em relação ao manejo C ($436,4 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 36,3%). Contrariamente, a atividade β -gli aumentou significativamente no manejo R quando contrastado com C nos contrastes R2-C2 ($297,9 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 82,1%) e R3-C3 ($654,6 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 185,0%). Na estação chuvosa, observou-se diferenças na atividade da β -gli nos contrastes R2-C2 ($170,2 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 38,6%), R3-C3 ($418,0 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 119,2%), e R5-C5 ($374,1 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 41,5%), onde a β -gli foi significativamente maior no manejo R em relação ao manejo C (Figura 11b).

Nos contrastes C-F e R-F da estação seca, a atividade da enzima β -gli foi consistentemente maior nos sistemas de manejo R e C (valores médios entre $274,0\text{-}679,8 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, e diferenças relativas entre 39,8%-144,3%) quando contrastados com sistemas de floresta nativa F, com exceção do contraste C2-F, onde a atividade da β -gli foi significativamente maior no sistema F. No entanto, embora a atividade da β -gli nos contrastes C-F e R-F da estação seca tenha sido maior nos manejos R e C em relação a F, os contrastes C1-F, C3-F e R6-F não apresentaram

diferenças (Figura 11b). Na estação chuvosa, não foi observado um comportamento consistente na atividade da β -gli nos contrastes C-F e R-F. Seis dos doze contrastes apresentaram diferenças estatísticas ($p < 0,05$), observando a atividade da β -gli maior nos manejos R e C quando comparados com F, em apenas quatro contrastes, C4-F ($414,2 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 41,9%), C5-F ($264,1 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 49,1%), C6-F ($320,6 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 81,0%), e R1-F ($228,5 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 57,6%). No contraste C2-F ($109,2 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 65,6%) e C3-F ($181,2 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 37,8%) os valores médios da atividade da β -gli foram menores no manejo C em relação a F (Figura 11b).

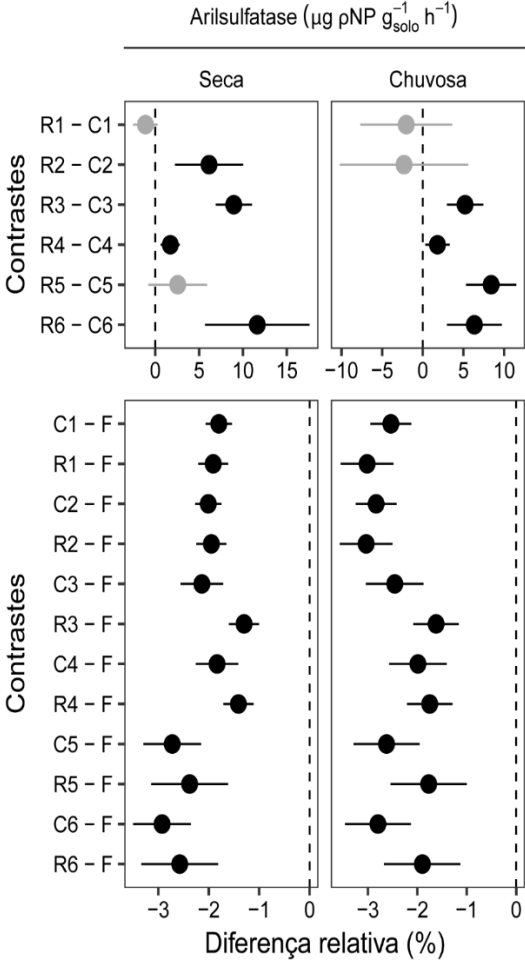
Por outro lado, na estação seca, os valores médios da FDA para os contrastes R-C, foram significativamente maiores sob o manejo R nos contrastes R2-C2 ($513,6 \mu\text{g fluoresceína g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 1,4%), R3-C3 ($288,1 \mu\text{g fluoresceína g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 0,8%) e R4-C4 ($326,9 \mu\text{g fluoresceína g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 2,6%), porém no contraste R1-C1 a atividade da FDA no sistema R diminuiu significativamente em relação ao manejo C ($279,8 \mu\text{g fluoresceína g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 1,4%) (Figura 11c). Na estação chuvosa, dois dos seis contrastes, apresentaram diferenças com consistência na direção do efeito positivo, ou seja, os valores médios da FDA sob manejo R foram maiores nos contrastes R5-C5 ($204,6 \mu\text{g fluoresceína g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 7,4%) e R6-C6 ($189,0 \mu\text{g fluoresceína g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 4,9%) (Figura 11c). Para os contrastes C-F e R-F na estação seca quanto a estação chuvosa, a FDA exibe um padrão de resposta consistente em todos os contrastes, indicando uma redução significativa (com exceção dos contrastes C1-F e R2-F na estação seca) da FDA no manejo R e C quando comparados com F, com valores médios entre $188,9$ - $427,9 \mu\text{g fluoresceína g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$ e diferenças relativa entre 30,7%-59,2% com aumento das diferenças na estação chuvosa entre 44,5%-88,9% (Figura 11c).

A atividade enzimática da fosfatase ácida nos contrastes R-C, da estação seca, apresentou diferenças em cinco dos seis contrastes, mas as respostas apresentaram um comportamento inconsistente. Nos contrastes R2-C2 ($1809,8 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 43,2%), R3-C3 ($2900,0 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 84,2%) e R4-C4 ($2650,2 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 52,1%) a fosfatase aumentou significativamente no manejo R em relação ao C. Contrariamente, nos contrastes R5-C5 ($1440,8 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 34,12%) e R6-C6 ($1239,3 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 33,5%) a atividade da fosfatase teve uma redução significativa no manejo R quando comparado com o C (Figura 11d). Na estação chuvosa, os contrastes R3-C3 ($2333,0 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 54,5%) e R5-C5 ($2001,0 \mu\text{g NP g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 33,5%) a atividade da fosfatase

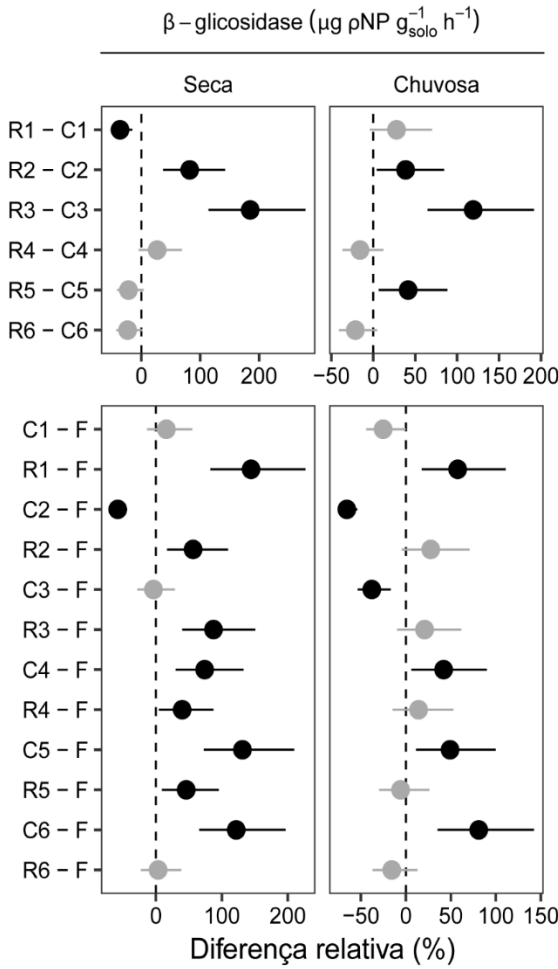
h^{-1} , 63,8%) apresentaram um aumento significativo da atividade da fosfatase no manejo R em relação ao C (Figura 18). Nos contrastes C-F e R-F, na estação seca quanto na estação chuvosa, quase a totalidade dos valores médios da fosfatase no manejo C e R foram menores em relação ao sistema F, exibindo um padrão de resposta consistente nos contrastes, e apresentando aumentos significativos da atividade da fosfatase na maioria das florestas contrastadas (Figura 11d).

A urease nos contrastes R-C na estação seca quanto na estação chuvosa não apresentou um comportamento consistente. Na estação seca a atividade da urease no manejo R foi significativamente maior em relação ao C, nos contrastes R3-C3 ($54,2 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 10,6%) e R4-C4 ($48,3 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 2,7%), porém nos contrastes R1-C1 ($21,8 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 3,7%) e R6-C6 ($28,9 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 1,7%) a atividade da urease teve uma redução significativa no manejo R em 1,7%-3,7%. Na estação chuvosa, os valores médios da urease sob manejo R foram maiores nos contrastes R3-C3 ($29,0 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 2,4%), R5-C5 ($35,3 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 10,0%) e R6-C6 ($26,1 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 8,3%) em relação ao C. Contrariamente, no contraste R2-C2 ($18,3 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$, 3,3%) a urease aumentou significativamente no manejo C (Figura 11d). Nos contrastes C-F e R-F, a totalidade dos valores médios da atividade da urease foi significativamente maior no sistema F na estação seca quanto na estação chuvosa, com valores entre $18,9\text{-}54,0 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$ e diferenças relativas entre 70,9%-84,1% para a estação seca, e $35,0\text{-}90,7 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}\text{solo h}^{-1}$ e diferenças relativas entre 76,2%-90,7% para a estação chuvosa (Figura 11e).

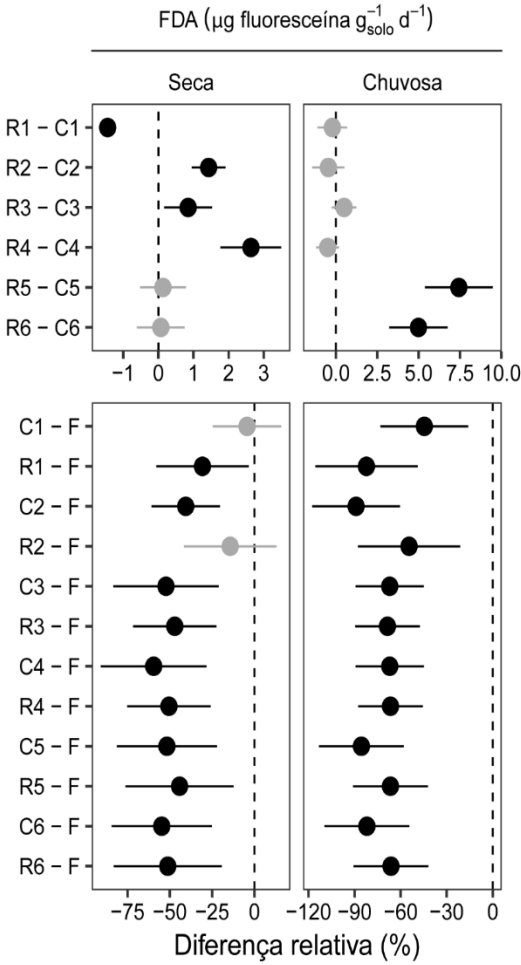
a



b



c



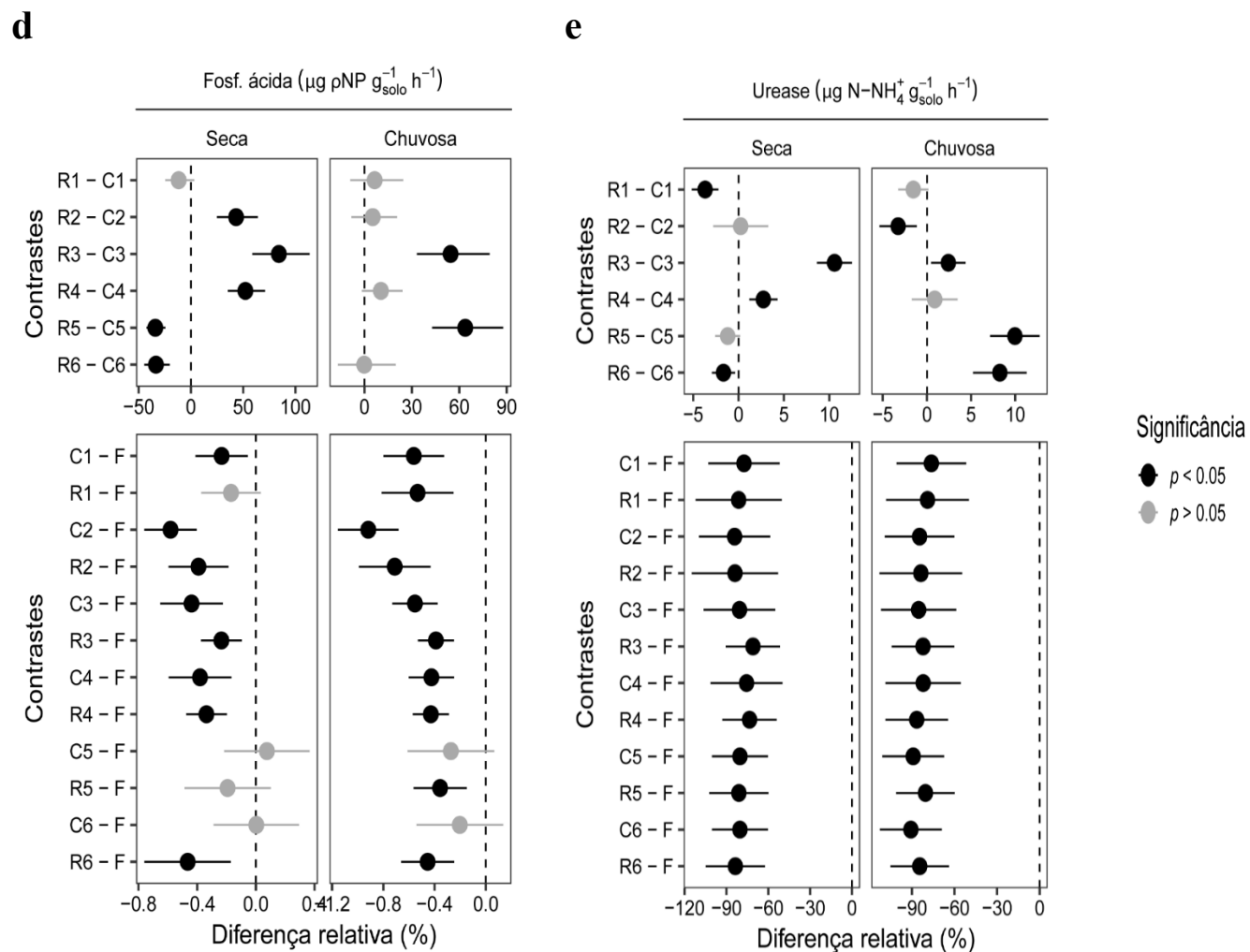


Figura 11. Gráfico de diferenças ou contrastes com intervalos de confiança.

Atividade enzimática (a) arilsulfatase, (b) β -glicosidase, (c) Hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA), (d) fosfatase ácida, (e) urease do solo em diferentes sistemas de manejo de café na estação seca (à esquerda) e chuvosa (à direita). O painel superior denota a direção e a magnitude das diferenças relativas (%) entre os sistemas de manejo regenerativo (R1-6) e convencional (C1-6). O painel inferior denota as diferenças.

3.3. Atributos químicos e físicos dos solos sob diferentes sistemas de manejo de café e floresta

Em geral, observando os dados químicos e físicos dos solos apresentam um comportamento de equilíbrio de acordo aos valores de referência da classe de interpretação de fertilidade no sistema de manejo de café (GUIMARÃES *et al.*, 1999; MESQUITA *et al.*, 2016). Na estação seca quanto na úmida, O pH, geralmente apresentaram valores inferiores aos requeridos pela cultura 5,5. Na floresta, os valores médios foram inferiores a 5,18. Os macronutrientes, P, K, Ca, Mg e S, sem restrições durante as épocas de avaliação, geralmente encachando na classe muito boa. Os micronutrientes, Zn, B, Cu, Mn e Fe, os valores médios indicaram o predomínio da classe muito boa, apenas com limitações de Zn no sistema R2 e de B no sistema R3 e C4 na estação seca (Tabela Anexa E). Valores embaixo do nível crítico para C1, C2, R1, R2 em Zn, no sistema R1, R2 em Mn e nos sistemas C3, C4 em B, na estação úmida (Tabela Anexa F). A floresta, exibiu valores menores aos sistemas agrícolas.

Na análise do complexo de troca catiônica, os resultados dos sistemas de manejo C e R, apresentaram valores considerados médio-bom, adequados para a cultura nas estações, os sistemas tem respostas de t entre 4,03 e 13,85 cmolc/dm⁻³. A (T) entre 9,17 e 16,55 cmolc/dm⁻³ classificados como médio a muito bom, considerados adequados para o cultivo. Além disso, foram observados valores médios da saturação por alumínio (m) menor a 15,0 %, saturação de bases (V) superior a 43%, o teor de matéria orgânica (MO) media a adequada, com valores geralmente maiores nas florestas chegando até 12,61%. Além disso, foi observado o predomínio da fração argila nos solos, independentemente das estações analisadas (Tabela E, F.).

3.4. Análise de componentes principais (PCA) dos sistemas manejo de café

Os resultados da PCA para atributos físico, químicos nos sistemas de manejo C e R na estação seca são representados em seus dois componentes principais: 41,49% no eixo 1 e 16,23% no eixo 2 (Figura 12. a). Os indicadores argila, Cu, K, Zn, m%, Al³⁺, Fe, S foram os atributos que melhor segregaram os sistemas de manejo R e os sistemas de manejo C. (Figura 12a). Na estação seca, o PC1 concentrou a maioria dos índices de fertilidade, além de MOS, Ca e Mg, enquanto o PC2 relacionou-se mais fortemente à textura, micronutrientes, K e S. Na estação chuvosa, o PC1 manteve a maioria dos índices de fertilidade e dos nutrientes, enquanto o PC2 representou a

influência da textura e do teor de Fe. Na estação úmida, as duas componentes resultantes da PCA para os atributos da fertilidade representaram 51,5% da variância total do conjunto de dados (Figura 21b). No eixo 1, foi representado 36,17%, enquanto no eixo 2, foi representado 15,33%. O PC 1 manteve a maioria dos índices de fertilidade e dos nutrientes, enquanto o PC2 representou a influência da textura e do teor de FeOs resultados da PCA para atributos microbiológicos nos sistemas de manejo C e R na estação seca são representados em seus dois componentes principais: 53,13% no eixo 1 e 18,47% no eixo 2 (Figura 12c). Os indicadores CBM, urease e arilsulfatase foram os atributos que melhor segregaram os sistemas de manejo C dos sistemas de manejo R. Por outro lado, o indicador hidrólise do diacetato de fluoresceína, quociente metabólico teve baixo nível de associação com o sistema de manejo R. Na estação úmida, as duas componentes resultantes da PCA para os atributos microbiológicos representaram 71,6% da variância total do conjunto de dados. No eixo 1, foi representado 53,13%, enquanto no eixo 2, foi representado 18,47%. Os atributos microbiológicos, CBM, arilsulfatase, β -glicosidase, fosfatase e urease, FDA, RESP, apresentaram a capacidade de discriminação entre os sistemas de manejo C e R. (Figura 12b).

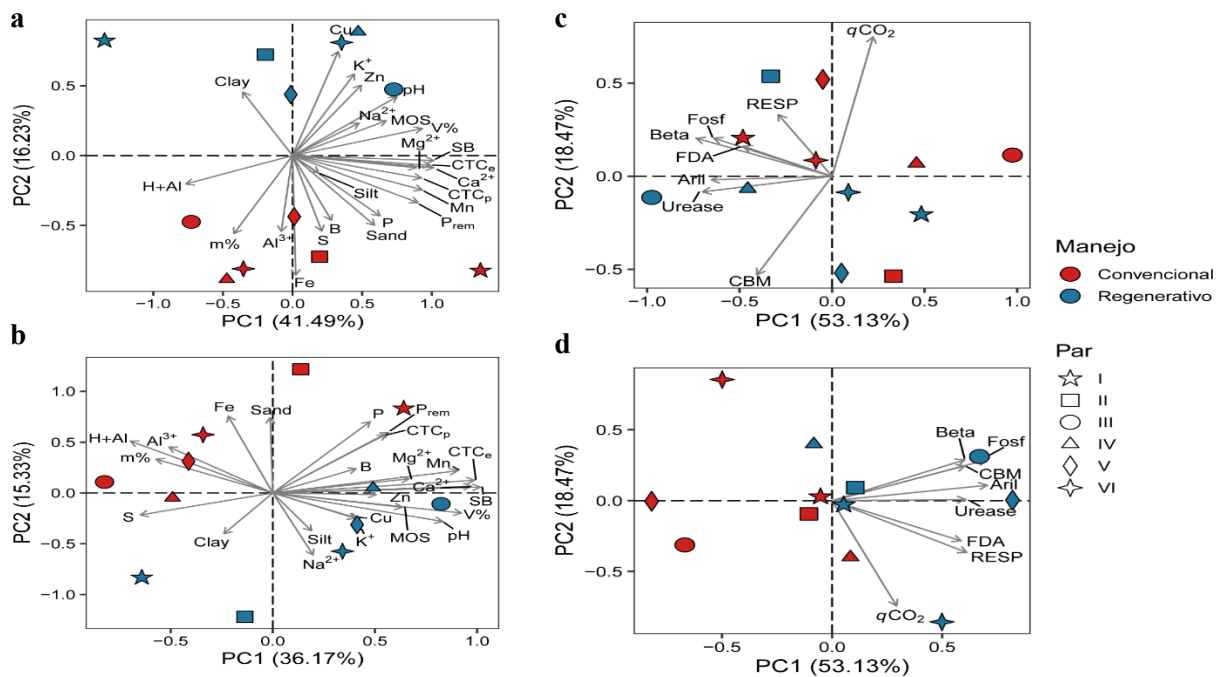


Figura 12. Análise de componentes principais (PCA) Atributos da fertilidade.

Esquerda (a, b.), atributos microbiológicos, direita (c, d.) do solo sob manejo da cultura de café, estação seca superior, estação chuvosa inferior. Vermelho: manejo convencional. Azul: manejo regenerativo; par I (C1-R1) par II (C2-R2), par III (C3-R3), par IV (C4-R4), Par V (C5-R5), Par V (C6-R6). pH: acidez ativa.

Macronutrientes K, P, Ca, Mg, S, Micronutrientes Zn, Fe, Mn, Cu, B. P-rem.SB: soma de bases, t: capacidade efetiva de troca catiônica, T: capacidade Potencial de troca catiônica. H+Al: acidez potencial, Al trocável; Acidez trocável. V: saturação por bases, m: % de saturação de alumínio, MO: matéria orgânica. Textura %, MCB: Carbono de biomassa microbiana; RESPI: respiração basal microbiana; qCO₂: quociente metabólico; β -gli: β -glicosidase; Aril: Arilsulfatase; Urease; Fosf: Fosfatase acida; FDA: hidrólise do diacetato de fluoresceína.

4. DISCUSSÃO

4.1. Carbono da biomassa microbiana, respiração basal microbiana e coeficiente metabólico

O carbono presente na biomassa microbiana é reconhecido como um indicador da qualidade do solo, sendo altamente suscetível às práticas de manejo (DE CARVALHO *et al.*, 2024; TEIXEIRA *et al.*, 2021). Na estação seca, o indicador CBM no sistema de manejo R, em comparação ao C, manteve diferenças significativas, como observado em R3 (84,4%) e R5 (53,8%) (Figura 10, 12c). Essas diferenças apresentadas apenas em dois dos seis contrastes podem ser atribuídas ao manejo, que favorece maior quantidade e diversidade de resíduos orgânicos, estimulando a atividade microbiana. Conforme relatado por Bastos *et al.* (2023), a quantidade e qualidade dos resíduos incorporados ao solo apresentam resposta reduzida sob monocultivo de cafeeiro quando comparadas a sistemas florestais, de aí que os valores de RESP nos solos sob os sistemas C e R não apresentaram diferenças na estação seca, possivelmente devido ao menor aporte de matéria orgânica (Figura 10b). Já o quociente metabólico (qCO₂) revelou comportamentos similares entre os sistemas C e R nesse período.

Por outro lado, na estação úmida, tanto o CBM quanto a RESP apresentaram aumento nos sistemas C e R em relação à estação seca (Tabela anexa E, I), refletindo a influência da maior precipitação e temperatura, além dos efeitos do manejo e dos aportes de adubos após a florada (MESQUITA *et al.*, 2016). Esse incremento pode estar associado ao efeito priming positivo, impulsionado pelo aporte de composto da polpa, adubo orgânico e sínteses, conforme descrito por Kuzyakov, Friedel e Stahr (2000). No caso do CBM, os maiores valores médios foram observados no sistema R, devido à adição constante de fontes orgânicas, controle mecânico de plantas daninhas e uso de plantas de cobertura, corroborando Jiang *et al.*, (2023) e Júnior *et al.*, (2017), e, Fernandes *et al.*, (2021), que relataram aumentos significativos de matéria orgânica do solo, carbono orgânico e CBM com a devolução da casca de café em diferentes níveis de fertilização inorgânica. De forma

semelhante, a RESP também foi superior nos sistemas R, refletindo a maior atividade microbiana e disponibilidade de nutrientes promovidas por práticas conservacionistas, conforme relatado Paolini (2018). Esse comportamento foi igualmente observado por Sánchez *et al.*, (2023), que associaram maiores taxas de respiração ao uso de diferentes doses de biochar de polpa de café em sistemas cafeeiros na Colômbia. No entanto, o quociente metabólico (qCO_2) não permitiu inferir um padrão claro, sugerindo uma eficiência metabólica semelhante entre os sistemas, conforme apontado por Barreto-García *et al.*, (2021). Assim, a interação entre as práticas de manejo e as condições ambientais da estação úmida favoreceu tanto o CBM quanto a RESP, mas sem diferenças significativas na eficiência metabólica entre os sistemas avaliados.

Os sistemas de manejo C e R apresentaram valores médios de CBM e RESP inferiores aos do sistema F durante as estações seca e úmida (Figuras 10a e 10b). Segundo Souza *et al.*, (2024), a conversão de sistemas nativos no Cerrado para a produção convencional reduz significativamente os níveis de CBM, refletindo a simplificação desses sistemas em comparação aos de maior preservação. Nunes *et al.*, (2009) observaram um padrão semelhante ao avaliar florestas e sistemas cafeeiros na Zona da Mata mineira, atribuindo essa diferença ao teor de matéria orgânica. A acumulação e qualidade da serrapilheira no café, em contraste com os sistemas florestais, também podem explicar as variações nos valores de CBM e RESP (BASTOS *et al.*, 2023; ROMERO *et al.*, 2023).

De acordo com Guimarães *et al.* (2017), a maior inclusão de vegetação e a ausência de perturbação do solo favorecem o aumento do CBM, com registros de até $796,83 \mu g C g^{-1}$ solo em áreas florestais. No presente estudo, o CBM nos solos manejados correspondeu a aproximadamente 60% do observado sob floresta nativa. A RESP, por sua vez, apresentou diferenças menores, com redução de 2 a 5% nos sistemas C e R em relação à floresta, possivelmente devido à maior decomposição e diversidade de substratos de carbono lábeis em F (SILVA *et al.*, 2021). Além disso, a RESP variou menos entre os sistemas C, R e F na estação seca, mas essa diferença se acentuou na estação úmida (Figura 10b). Essa tendência foi corroborada por Lourente *et al.*, (2011), que associaram a RESP à umidade do solo, favorecendo a respiração microbiana em ambientes florestais. Da mesma forma, Rodrigues *et al.*, (2023) relataram que o aumento da umidade do solo em áreas florestais estimula a atividade microbiana, ao avaliarem a influência do estresse hídrico na floresta Amazônica. Guo *et al.*, (2022) também destacaram que a redução da diversidade e

quantidade de resíduos em monoculturas resulta em menor disponibilidade de carbono e, consequentemente, na redução da biomassa microbiana e sua atividade.

O qCO₂ apresentou valores consistentemente maiores nos sistemas C e R, com aumentos de até 200-400%, indicando que F possui maior estabilidade na microbiota do solo, devido aos maiores aportes de biomassa ao longo do tempo (Figura 10c). Segundo Bastos *et al.*, (2023), o conteúdo de carbono orgânico do solo (SOC) influencia positivamente a eficiência de conversão desse carbono em CBM, reduzindo o efluxo de carbono para a atmosfera. De Carvalho *et al.*, (2024) observaram que sistemas de café em monocultura possuem 45% menos SOC e 75% menos CBM em comparação aos sistemas nativos, sugerindo que o maior teor de CBM em F reflete uma maior eficiência na imobilização de carbono. Valores reduzidos de qCO₂ indicam um maior dreno de carbono para o solo em sistemas florestais, associados a uma maior complexidade e equilíbrio do ambiente (TAVARES *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2021).

4.2. Atividades enzimáticas

Diversos indicadores microbiológicos, como as atividades enzimáticas (arilsulfatase, β -glicosidase, hidrólise de diacetato de fluoresceína, fosfatase e urease), são essenciais para avaliar a qualidade do solo devido ao seu papel na decomposição de resíduos orgânicos e ciclagem de nutrientes (ARAGÃO *et al.*, 2020a; MENDES *et al.*, 2021). Neste estudo, a arilsulfatase destacou-se pelo padrão de resposta observado nos contrastes, entre R e C, com valores entre 1,7% e 11,8% superiores nos sistemas regenerativos nas estações avaliadas. A atividade da FDA exibiu um comportamento semelhante, com valores entre 1,4% e 2,6% superiores no sistema R em relação ao C, ampliando essa diferença durante a estação chuvosa. No entanto, a β -glicosidase não apresentou um padrão de resposta reprodutível nas comparações, como observado para a arilsulfatase e a FDA. Mas quando houve diferenças entre os sistemas R e C, os valores da β -glicosidase, variaram entre 30% e 180%.

De acordo com Hendriksen *et al.*, (2016) identificaram que as enzimas respondem tanto às zonas biogeográficas quanto ao uso da terra, influenciada pelo teor de matéria orgânica. Esses resultados corroboram também a Vanegas, Zambrano e Avellaneda (2018), que relataram a influência positiva do manejo ecológico na atividade enzimática do solo em sistemas de café, sendo as práticas de manejo do sistema orgânico como também observado com outras práticas de manejo

no cultivo de café no Cerrado por Rodrigues *et al.*, (2021) e, Silva *et al.*, (2019), diferentes regimes hídricos e aplicação de calcário em consórcio com braquiária modificam o comportamento das atividades da arilsulfatase, β -glicosidase. Entretanto Bastos *et al.*, (2023) e Chen *et al.*, (2019) relacionaram as mesmas atividades aos maiores teores de serrapilheira, nitrogênio orgânico, textura do solo, pH, carbono orgânico.

Wen *et al.*, (2024), em uma meta-análise com 308 publicações, também sugerem que sistemas conservacionistas promovem acúmulo de nutrientes no solo aumentando múltiplas atividades enzimáticas. Isso pode explicar os maiores valores de arilsulfatase, β -glicosidase e, FDA principalmente na estação úmida. Dessa forma, os sistemas R podem ser caracterizados por sua natureza conservacionista, devido aos maiores aportes de matéria orgânica, práticas de conservação do solo, uso de insumos biológicos, biofertilizantes, biopesticidas, microrganismos benéficos, com redução de uso de defensivos, fatores que favorecem uma maior expressão da atividade enzimática. A atividade da β -glicosidase na estação seca, comprometeu sua sensibilidade como indicador dos efeitos do manejo. Segundo Rodrigues *et al.*, (2021) e Filho *et al.*, (2021), essa enzima é geralmente sensível a alterações no uso do solo e práticas de manejo; entretanto, neste estudo, fatores ambientais e o histórico de manejo semelhante com um tempo de implementação das práticas conservacionistas ainda insuficiente para maximizar as diferenças. entre os sistemas podem ter limitado sua capacidade de detecção.

A atividade da fosfatase ácida apresentou diferenças estatisticamente significativas em cinco dos seis contrastes, enquanto a urease exibiu diferenças em quatro dos seis contrastes na estação seca, dificultando estabelecer um padrão de resposta nesse período (Figura 11d, e). A fosfatase nos sistemas R2, R3 e R4 apresentou diferenças positivas em relação ao sistema C, com comportamento semelhante ao da arilsulfatase e da FDA. Para a urease, os valores médios de R3 e, R4 ($54,1-48,3 \mu\text{g g}^{-1} \text{N-NH}_4$) superiores aos dos sistemas C e comparáveis aos de cafezais convencionais de alta produtividade em Patrocínio ($10,3-29,3 \mu\text{g g}^{-1} \text{N-NH}_4$), conforme relatado por Aragão *et al.*, (2020). Esse padrão indica uma resposta a práticas de manejo, aporte de matéria orgânica, consórcios e coberturas vegetais nos sistemas regenerativos.

Na estação chuvosa, a resposta da fosfatase em R3 (54%) e R5 (63%), e da urease em R3 (2,4%), R5 (10,0%) e R6 (8,3%) em relação a C, evidenciam diferenças significativas. Oberson *et al.*, (1996) observaram maior atividade da fosfatase ácida em sistemas biológicos devido à adição de matéria orgânica e adubos verdes. Balota e Chaves (2010) também destacaram que o uso de

adubos verdes à base de leguminosas aumenta a atividade da urease no solo em sistemas cafeeiros, o que pode justificar os resultados deste estudo. Por outro lado, Rosolem, Merlin e Bull (2014) relataram que a aplicação de fertilizantes fosfatados do como o produto final da reação enzimática (NH_4^+) pode reduzir a atividade das enzimas em sistemas que priorizam o uso de adubos sintéticos, pois fornecem P e N diretamente ao solo (BANDICK; DICK, 1999).

No caso da floresta nativa, os valores médios dos indicadores arilsulfatase (1,3-3,0%), FDA (30,7-88,9%), fosfatase (0,20-0,91%) e urease (70,9-90,71%) geralmente menores nos sistemas C e R em comparação ao sistema F, tanto na estação seca quanto na chuvosa (Tabelas Anexas L e M). Esse comportamento pode ser associado ao indicador CBM, conforme relatado por Melloni et al. (2013) e Bandick e Dick (1999), que indicam que a atividade microbiana aumenta com a adição de fontes de carbono ou condições ambientais favoráveis. Seguindo a linha de raciocínio permite inferir sob os aportes superiores da biomassa vegetal nas florestas em relação as culturas (CIANCIARUSO *et al.*, 2006), podem beneficiar à biomassa microbiana e as atividades (DA CUNHA *et al.*, 2021; PEREIRA *et al.*, 2024), com maior efeito, da maior diversidade microbiana nos sistemas F, e que não resulta nas monoculturas por diminuição na variedade de habitats e fontes de nutrientes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Conforme relatado por Bastos *et al.*, (2023) e Aragão *et al.*, (2023), a capacidade dos sistemas nativos de acumular serrapilheira e a composição química dos resíduos depositados dos diferentes estratos da floresta interfere para a maior atividade das enzimas. Nesse sentido, Cianciaruso *et al.*, (2006) avaliando a produção de serapilheira no Cerradão, estabeleceu quantidade de serapilheira na ordem de $5646 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, e $4081 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ de folhas, isto poderia atuar como fonte de substrato potencial para a fosfatases, urease, arilsulfatase e FDA (BANERJEE; SANYAL; SEN, 2012). Por outro lado, a menor atividade média nos sistemas C pode estar associada ao uso frequente de pesticidas, herbicidas, ausência de cobertura vegetal e fertilizantes sintéticos, que inibem a atividade microbiana (MELLONI *et al.*, 2013; ZAIDAN *et al.*, 2023). Ou as mesmas práticas como a calagem nos sistemas C quanto R, o que reduz a atividade de diferentes enzimas, e especificamente fosfatase, devido ao efeito no pH do solo (Varma e Shukla, 2011).

Na estação seca, a atividade da urease foi mais elevada em F (figura 11e), com valores entre 117,1 e 186,1 $\mu\text{g g}^{-1} \text{ N-NH}_4$, e na estação úmida, entre 124,1 e 175,6 $\mu\text{g g}^{-1} \text{ N-NH}_4$. Aragão *et al.*, (2023) observaram valores de urease semelhantes em sistemas de floresta e café, sendo maiores na

floresta devido à textura argilosa e ao teor de matéria orgânica. Nosso estudo, coincide com esses resultados, com teor da matéria orgânica variando entre 4,29 e 10,96 dag kg⁻¹ na estação seca, e entre 4,01 e 12,61 dag kg⁻¹ na estação úmida, e predominância de textura argilosa nos sistemas, favorecendo a atividade enzimática (Tabela Anexa E e, F), indicando que os teores de matéria orgânica (MO) são superiores no sistema F, seguidos pelos sistemas R e C.

A atividade da β -glicosidase apresentou um comportamento distinto dos demais indicadores enzimáticos avaliados, exibindo maior atividade nos sistemas cafeeiros em oito contrastes. Esses resultados diferem dos encontrados por Bastos *et al.* (2023), que observaram maior atividade da β -glicosidase em sistemas florestais, atribuída à maior incorporação e diversidade da biomassa retornada. Em ecossistemas florestais, o solo tende a ser mais estável e menos perturbado, resultando em menor demanda por atividades enzimáticas relacionadas à decomposição e ciclagem de nutrientes em comparação com solos agrícolas (VARMA; SHUKLA, 2011). Na estação úmida, as diferenças na atividade da β -glicosidase entre os contrastes foram menores nos sistemas R e F, com diferenças notáveis apenas entre C e F. A ausência de um padrão definido sugere que a atividade da β -glicosidase pode ser mais expressiva em períodos de maior limitação, como na estação seca, e menos diferenciada em condições mais favoráveis, como na estação úmida (Figura 11b).

4.3. Atributos físico-químicos

Os atributos físico-químicos do solo avaliados neste estudo, que incluem os teores de macronutrientes, micronutrientes e atributos associados à fertilidade, estavam adequados para a cultura de cafeeiro, independentemente da estação de amostragem de solos (MESQUITA *et al.*, 2016). Porém, os sistemas de manejo R estão associados a uma maior fertilidade no período seco (Tabela anexa E). Especificamente, foram geralmente observados maiores valores de indicadores como Cu, K, Zn, pH, no sistema regenerativo período seco. No entanto, Essa diferença permanece na estação úmida, inclusive intensificando-se, já que mais nutrientes se correlacionaram ao PC1, que foi o principal responsável pela separação entre os manejos C e R, havendo geralmente fertilidade similar entre os sistemas, com maior associação de valores de pH, K, Cu, Zn, MOS, V%, SB no sistema regenerativo e, m%, H+Al, Al³⁺ nos sistemas convencionais (Figura 12 a, b.).

A adubação no sistema R promoveu diferenças em comparação ao sistema C. A floresta apresentou maior acidez ativa média (pH = 4,9) e menores teores de bases trocáveis, indicando

baixa fertilidade natural, possivelmente ligada ao material de origem do solo e ao intemperismo intenso (SOUSA *et al.*, 2007). Os maiores teores de fósforo (P) no solo sob sistema C refletem a alta aplicação de fontes fosfatadas. No sistema R, o P possivelmente foi suprido as doses altas, mas complementado via adubação orgânica, que resulta em baixos teores de P, tal fato foi corroborado por (MALTA *et al.*, 2008) classificando como baixo uma vez foram utilizadas somente fontes orgânicas. Houve também um aumento significativo nos teores de potássio K nos cafeeiros em relação à mata natural, atribuídos à adubação que incluía casca e palha de café, ricas nesses nutrientes (THEODORO *et al.*, 2003), além de cálcio e o magnésio, sendo tal fato relacionado a adição de Mg via calagem nos sistemas C e R. (GUIMARÃES *et al.*, 2013). Essa diferença na fertilidade do solo no período seco e chuvoso, nos sistemas de manejo foi um efeito esperado neste trabalho, pois tanto os sistemas C e R foram submetidos a práticas de manejo agrícola diferindo da floresta natural (Tabela anexa E, F.).

5. CONCLUSÃO

Nos sistemas de produção de café, os indicadores CBM e atividades enzimáticas, como arilsulfatase e FDA na estação seca, e CBM, RESP, arilsulfatase, β -glucosidase, FDA, fosfatase ácida e urease na estação úmida, se relacionados ao manejo regenerativo. Em contraste, no sistema de produção convencional, não apresento relação com os atributos microbiológicos. No entanto, o coeficiente metabólico qCO_2 não apresentou uma relação com os sistemas de manejo nas estações.

De modo geral, a forma de manejo para a produção de café convencional proporciona uma menor fertilidade do solo, essa diferença permanece na estação úmida. A floresta, independente da estação tem maior resposta os indicadores microbiológicos que os sistemas de café e apresentar maiores valores de CBM e da atividade enzimática (arilsulfatase, urease, fosfatase ácida e FDA), exepetuando a β -glicosidase e qCO_2 . Os resultados permitem estabelecer um gradiente de resposta, solos sob floresta nativa possuem a melhor qualidade, seguidos pelo sistema de café regenerativo, com qualidade intermediária. O sistema de café convencional apresenta a menor qualidade. Durante a estação úmida, os indicadores microbiológicos demonstram maior capacidade de discriminar os diferentes sistemas de manejo convencional e regenerativo com maior atividade em comparação com a estação seca.

REFERENCIAS

- ALEF, Kassem; NANNIPIERI, Paolo. Estimation of microbial activities. **Academic Press**, 1995.
- ALTIERI, M. Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios. Agroecología: El camino hacia una Agricultura Sustentable, **Ediciones Científicas Americanas** ISBN [S. l.], p. 27–34, 2001.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. 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**, v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993.
- ARAGÃO, O. O. S. et al. Physical, Chemical, and Microbiological Attributes as Discriminators of Coffee-Growing and Forest Sites in Different Soils in the Brazilian Atlantic Forest Biome. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 4, p. 6767–6776, 2023.
- ARAGÃO, O. O. S. et al. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 106205, 2020.
- BALOTA, Elcio Liborio; CHAVES, Julio César Dias. Enzymatic activity and mineralization of carbon and nitrogen in soil cultivated with coffee and green manures. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 1573–1583, 2010.
- ARRUDA, T. J. M. et al. Elementos De Inovação Para O Desenvolvimento Sustentável Da Cafeicultura Indígena Na Amazônia. **Gestão & Regionalidade**, [S. l.], v. 36, n. 108, 2020.
- BANDICK, Anna K.; DICK, Richard P. Field management effects on soil enzyme activities, v. 31, 1999.
- BANERJEE, A.; SANYAL, S.; SEN, S. Soil phosphatase activity of agricultural land: A possible index of soil fertility. **Agricultural Science Research Journals**, v. 2, n. 7, p. 412–419, 2012.
- BARRETO-GARCIA, P. A. B. et al. Short-term effects of forest management on soil microbial biomass and activity in caatinga dry forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 481, p. 118790, 2021.
- BASTOS, R. S. T. et al. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **CATENA**, v. 230, p. 107270, 2023.
- BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 120, n. February, p. 105–125, 2018.
- CHEN, H. et al. Controls on soil arylsulfatase activity at a regional scale. **European Journal of Soil Biology**, v. 90, n. November 2018, p. 9–14, 2019.

CIANCIARUSO, M. V. et al. Produção de serapilheira e decomposição do material foliar em um cerrado na Estação Ecológica de Jataí, município de Luiz Antônio, SP, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 1, p. 49–59, 2006.

CLIMATE-DATA.ORG. **Datos climáticos mundiales - Climate-Data.org**. 2024. Disponível em: <https://es.climate-data.org/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

DA CUNHA, J. R. et al. Soil biological attributes in monoculture and integrated systems in the cerrado region of Piauí State, Brazil. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 43, p. 1–9, 2021.

DE CARVALHO, F. F. et al. Effects of Coffee arabica cultivation systems on tropical soil microbial biomass and activity in the northeast region of Brazil. **Agroforestry Systems**, n. 0123456789, 2024.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. *In*: Methods for Assessing Soil Quality. **American Society of Agronomy**, Madison, WI, p. 247–271. 1996.

DORAN, John W.; PARKIN, Timothy B. Defining and assessing soil quality. Defining soil quality for a sustainable environment. **USA: SSSA Special Publication**, v. 35, n. 35, p. 1–21, 1994.

DUTRA, M. S. R.; DE SOUZA, M. M. O. Cerrado, revolução verde e evolução do consumo de agrotóxicos. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 473–488, 2017.

FERNANDES, A. L. T. et al. Organic and organic-mineral fertilization of coffee shrubs by drip irrigation. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, 2021.

FIGUEIREDO, VG De; GOMES, M. de Araújo; CARRERO, GC. Sistemas agrofloretais e a produção de café agroflorestral na Amazônia. **Researchgate.Net**, 2016.

FILHO, A. P. M. et al. Impact of coffee Biochar on carbon, microbial biomass and enzyme activities of a sandy soil cultivated with bean. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. 4, p. 1–15, 2021.

GREEN, V. S.; STOTT, D. E.; DIACK, M. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: Optimization for soil samples. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 4, p. 693–701, 2006.

GUIMARÃES, G. P. et al. Avaliação da qualidade do solo e de cafeeiros em propriedade familiar do Território do Caparaó-ES Caparaó-ES. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 236–246, 2013.

GUIMARÃES, N. F. et al. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 34–44, 2017.

GUO, J. et al. The negative effect of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) monoculture plantations on soil physicochemical properties, microbial biomass, fungal communities, and enzymatic activities. **Forest Ecology and Management**, v. 519, p. 120297, 2022.

HENDRIKSEN, N. B. et al. Soil exo-enzyme activities across Europe-The influence of climate, land-use and soil properties. **Applied Soil Ecology**, v. 97, p. 44–48, 2016.

HOEFT, R.G., Walsh, L.M., Kenney, D.R. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 37, 401–411, 1973.

JIANG, Z. et al. Combined application of coffee husk compost and inorganic fertilizer to improve the soil ecological environment and photosynthetic characteristics of arabica coffee. **Agronomy**, v. 13, n. 5, p. 1212, 2023.

JUNIOR, R. R. A. et al. Chemical and microbiological soil properties in organic and conventional management systems of *Coffea arabica* L. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 14, p. 2076–2086, 2017.

KIM, N. et al. Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 142, p. 107701, 2020.

KUZYAKOV, Y.; FRIEDEL, J. K.; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 11–12, p. 1485–1498, 2000.

LOURENTE, E. R. P. et al. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 41, n. 1, p. 20–28, 2011.

MALTA, M.R. et al. Caracterização de lavouras cafeeiras cultivadas sob o sistema orgânico no sul de Minas Gerais. **Ciência & Agrotecnologia**, v.32, n.5, p. 1402-1407, 2008.

MCLEAN, E.O., et al., Aluminum in soils: I. extraction methods and magnitudes in Ohio clays and soils 1. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 22, 382. 1958.

MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄. North Carolina Soil Testing Division, Raleigh. 1953.

MELLONI, R. et al. Métodos de controle de plantas daninhas e seus impactos na qualidade microbiana de solo sob cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 66–75, 2013.

MENDES, I.C. et al. Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. **Documentos Embrapa**, v. 369, p. 1–50, 2021.

MESQUITA, C. M. D. et al. Manual do café: Manejo de Cafezais Em Produção. **Emater-Mg**, v. 1, p. 72, 2016.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. **Editores UFLA**, p. 407–447, 2006.

NUNES, A. P. L. et al. Impact of monocultivation coffee on biological indicators of quality soil in the zona da mata (MG), Brazil. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. dez, n. 9, p. 2467–2474, 2009.

OBERSON, A. et al. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. **Biology and Fertility of Soils**, v. 21, n. 3, p. 138–148, 1996.

PAOLINI, J E G. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. **Revista Terra Latinoamericana**, v. 36, n. 1, p. 13, 2018.

PENA, C.; MARQUES, M.; LASCHEFSKI, K. A. Agroecologia como prática espacial insurgente ou como agroecologia débil: o uso do termo na produção científica no Brasil. **Revista NERA**, v. 25. N. 64, p. 72–101, 2022.

PEREIRA, E. O. et al. Microbiological attributes as indicators of soil quality in coffee growing systems in Southwest Bahia, Brazil. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 55, n. 2, p. 1841–1852, 2024.

PERIS, M.M. et al. La calidad de las prácticas agrícolas en el proceso transformación a la agricultura ecológica en enguera y anna (COMUNIDAD VALENCIANA). **Cuadernos geográficos**, v. 31, p. 129–147, 2001.

PIMENTEL, M. S. et al. Bioindicators of soil quality in coffee organic cultivation systems. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 46, n. 5, p. 545–552, 2011.

RODRIGUES, P. G. et al. Variações nos atributos microbiológicos do solo na floresta amazônica oriental, sob condição natural, estresse hídrico e em sistemas. **Acta Geográfica**, v. 16, n. 42, p. 56–76, 2023.

RODRIGUES, R. N. Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria. **Ciencia Rural**, v. 52, n. 3, p. 1–12, 2021.

ROMERO, F. A. et al. The coffee-mango association promotes favorable soil conditions for better-nourished and higher-yielding plants. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 354, p. 108589, 2023.

ROSOLEM, C. A.; MERLIN, A.; BULL, J. C. L. Soil phosphorus dynamics as affected by Congo grass and P fertilizer. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 4, p. 309–315, 2014.

SÁNCHEZ, R. A. D. et al. The Application of Coffee Pulp Biochar Improves the Physical, Chemical, and Biological Characteristics of Soil for Coffee Cultivation. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 2, p. 2512–2524, 2023.

SANTOS, H. G. dos. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018

SHOEMAKER, H.E., MCLEAN, E.O., PRATT, P.F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Sci. Soc.Am. Proc.** 25, 274–277. 1961

SILVA, B. M. et al. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. **Soil and Tillage Research**, v. 189, n. December 2018, p. 36–43, 2019.

SILVA, M. O. et al. Soil Quality: Biological Indicators for Sustainable Management. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853–6875, 2021.

SOUSA, D.M.G. et al. Acidez do solo e sua correlação. In: NOVAIS, R.F. et al. Fertilidade do Solo. 1.ed. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. p.205-274, 2007. Cap.5.

SOUZA, P. T. D. et al. Variabilidade espacial da biomassa e atividade microbiana do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 1949–1967, 2021.

SOUZA, W. S. et al. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de manejo no Cerrado Piauiense. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. e04807, 2024.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. In: **Soil Biology and Biochemistry**, v. 1p. 301–307.

TAVARES, P. D. et al. Soil quality under agroforestry systems and traditional agriculture in the Atlantic Forest biome. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 4, p. 954–962, 2018.

TEIXEIRA, H. M. et al. Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic Forest of Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 305, p. 107171, 2021.

TEIXEIRA, Paulo César. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Embrapa ed. Brasília, DF. 2017

THEODORO, V.C.A. et al. Alterações químicas em solo submetido a diferentes formas de manejo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.27, p.1039-1047, 2003.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

VANEGAS, J. J. C.; ZAMBRANO, K. B. M.; AVELLANEDA, T. L. M. Effect of ecological and conventional managements on soil enzymatic activities in coffee agroecosystems. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 48, n. 4, p. 420–428, 2018.

VARMA, Ajit; SHUKLA, Girish. (Eds.). **Soil Biology**. v. 22. Heidelberg: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-14224-6. e-ISBN 978-3-642-14225-3. Disponible en: <http://www.springer.com/series/513>.

WALKLEY, A., BLACK, I.A., An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.** 37, 29–38. 1934.

WEN, L. et al. Conservation tillage increases nutrient accumulation by promoting soil enzyme activity: a meta-analysis. **Plant and Soil**, n. 0123456789, 2024.

ZAIDAN, Ú. R. et al. Soil microbiological indicators in *Coffea arabica* crops under different weed management strategies. **Phytoparasitica**, p. 1–19, 2023.

ZHAO, Q. et al. Long-Term Coffee Monoculture Alters Soil Chemical Properties and Microbial Communities. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–11, 2018.

ANEXOS

CAPITULO II

Tabela A. Atributos físicos e químicos das áreas de campo da fazenda NKG e Fazenda Samambaia, coletadas no município Santo Antonio do Amparo, no período seco 2021 e chuvoso 2022. Estação seca, Classes de interpretação de fertilidade.

Indicador	pH	K	P	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	M.O.	P-Rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	Argila	Silte	Areia
Talhão	pH	K	P	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	M.O.	P-Rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	Argila	Silte	Areia
Talhão		mg/dm ³			cmolc/dm ³			cmolc/dm ³			%		dag/kg	mg/L								dag/kg	
Z4	6,00	163,26	24,40	3,85	1,51	0,16	3,36	5,78	5,94	9,14	63,89	2,82	3,22	31,46	4,12	28,16	11,32	3,00	0,26	21,98	53,40	14,20	32,40
Z5	6,14	90,20	23,15	3,75	1,57	0,22	4,66	5,56	5,78	10,22	52,81	4,94	3,67	34,24	3,64	22,84	6,34	3,04	0,33	22,86	54,40	17,00	28,60
GA	6,34	88,40	63,00	2,46	2,32	0,10	2,96	5,01	5,11	7,97	61,93	2,10	2,46	29,08	4,90	21,20	5,08	3,57	0,20	55,86	48,80	18,20	33,00
BU	6,04	112,15	70,13	4,11	1,69	0,16	4,46	6,13	6,25	10,55	57,26	2,79	3,72	27,40	5,34	20,70	6,64	3,27	0,22	46,42	50,80	20,00	29,20
BII	7,00	172,21	74,80	4,18	2,35	0,10	1,22	6,98	7,08	8,20	85,00	1,45	2,50	34,86	3,88	17,32	7,46	2,89	0,38	52,76	48,60	14,20	37,20
BIII	6,86	184,60	113,61	4,17	2,13	0,12	2,50	6,77	6,89	9,27	73,79	1,86	2,45	34,10	6,76	28,20	7,86	3,03	0,29	13,82	50,00	14,20	35,80
CA20	6,74	97,84	49,06	2,58	1,35	0,10	1,74	4,18	4,28	5,92	70,09	2,42	2,11	28,74	5,32	22,76	3,48	2,43	0,24	23,08	43,80	7,60	48,60
CA16	6,42	84,68	61,91	3,46	1,09	0,10	3,48	4,76	5,06	8,24	58,28	2,14	2,52	30,60	7,60	23,76	6,48	4,22	0,12	17,82	49,80	9,80	40,40
SA29	6,00	98,77	19,38	3,57	1,68	0,14	4,61	5,51	5,65	10,11	54,83	2,67	3,50	27,88	2,24	34,36	20,36	3,85	0,27	32,74	53,80	15,00	31,20
SA25	6,28	81,64	27,45	1,49	1,00	0,18	3,24	2,71	2,89	5,95	45,80	7,83	2,40	31,24	1,14	33,70	7,52	4,75	0,47	30,14	48,40	15,80	35,80

Estação úmida, Classes de interpretação de fertilidade.

Classes de fertilidade do solo, de acordo valores de referência dos atributos químicos para o cafeeiro descritos por Mesquita et al. (2016), e pelo manual de recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes de solo em Minas Gerais, conforme Guimarães et al., (1999). Sendo Azul, Muito Bom; Verde, Bom; Amarelo, Medio; Vermelho, Baixo ou Muito Baixo.

Tabela B Atributos físicos e químicos dos talhões de maior e menor produtividade coletadas no período seco.

Atributos Químicos												
	pH H ₂ O ⁽¹⁾	K ⁽²⁾	P ⁽²⁾	Ca ²⁺⁽³⁾	Mg ²⁺⁽³⁾	S	P-Rem	Zn ⁺²	Fe ⁺²	Mn	Cu	B
		mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/L ⁻¹	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³
Z4	5,1 ± SD 0,33 SE (0,15)	251,6 ± 15,8 (7,05)	106,5 ± 116,8 (52,2)	3,3 ± 1,0 (0,4)	1,39 ± 0,6 (0,29)	47,8 ± 31,8 (14,3)	25,1 ± 5,8 (2,6)	4,1 ± 0,9 (0,4)	36,0 ± 6,4 (2,87)	31,3 ± 11,1 (4,97)	4,1 ± 1,7 (0,8)	0,52 ±0,17 (0,03)
Z5	5,28 ± 0,46 (0,21)	232,5 ± 49,3 (22,1)	55,0 ± 46,3 (20,7)	3,1 ± 0,9 (0,4)	1,20 ± 0,38 (0,17)	53,5 ± 30,3 (13,6)	29,2 ± 2,6 (1,2)	7,2 ± 3,2 (1,4)	23,6 ± 5,8 (2,6)	9,02 ± 2,50 (1,12)	58,2 ± 124 (55,5)	0,74 ± 0,14 (0,06)
GA	5,32 ± 0,54 (0,24)	186,0 ± 35,8 (16,0)	23,3 ± 14,3 (6,4)	2,2 ± 0,8 (0,4)	0,77 ± 0,20 (0,09)	87,0 ± 27,6 (12,3)	20,1 ± 3,8 (1,7)	4,8 ± 3,2 (1,5)	25,8 ± 6,4 (2,9)	8,32 ± 6,53 (2,92)	4,6 ± 0,8 (0,4)	0,39 ± 0,07 (0,03)
BU	5,90 ± 0,49 (0,22)	286,4 ± 62,8 (28,1)	100,8 ± 139,4 (62,4)	5,0 ± 0,8 (0,4)	1,45 ± 0,25 (0,11)	88,0 ± 35,5 (15,9)	22,0 ± 1,6 (0,7)	10,3 ± 3,0 (1,4)	16,6 ± 4,8 (2,1)	11,16 ± 2,42 (1,08)	3,7 ± 0,8 (0,3)	0,61 ± 0,24 (0,11)
BII	5,52 ± 0,53 (0,24)	279,6 ± 36,7 (16,4)	24,3 ± 6,0 (2,7)	2,6 ± 0,8 (0,4)	1,13 ± 0,32(0,15)	116,2 ± 57,9 (25,9)	21,4 ± 3,9 (1,7)	2,3 ± 0,9 (0,4)	20,6 ± 3,8 (1,7)	5,02 ± 2,02 (0,91)	3,6 ± 1,2 (0,5)	0,53 ± 0,06 (0,03)
BIII	5,72 ± 0,41 (0,19)	391,8 ± 101,3 (45,3)	98,5 ± 81,3 (36,3)	3,1 ± 0,7 (0,3)	1,48 ± 0,91 (0,41)	96,9 ± 51,0 (22,8)	25,5 ± 8,4 (3,8)	6,1 ± 3,5 (1,5)	29,4 ± 9,2 (4,0)	6,56 ± 1,13 (0,51)	4,2 ± 1,0 (0,4)	0,47 ± 0,12 (0,05)
CA20	5,26 ± 0,36 (0,16)	229,1 ± 51,3 (22,9)	46,9 ± 42,1 (18,8)	2,3 ± 0,8 (0,4)	0,96 ± 0,31 (0,14)	82,8 ± 41,9 (18,7)	34,9 ± 3,6 (1,6)	4,8 ± 1,9 (0,8)	30,3 ± 8,4 (3,8)	3,86 ± 1,18 (0,53)	2,8 ± 0,50 (0,2)	0,66 ± 0,10 (0,04)
CA16	5,42 ± 0,45 (0,2)	249,2 ± 78,1 (34,9)	37,4 ± 15,6 (7,0)	3,1 ± 0,7 (0,3)	1,14 ± 0,34 (0,15)	77,6 ± 27,9 (12,5)	32,6 ± 3,1 (1,4)	8,1 ± 0,8 (0,3)	24,4 ± 7,0 (3,1)	7,22 ± 1,01(0,45)	5,2 ± 1,1 (0,5)	0,44 ± 0,08 (0,04)
SA29	5,28 ± 0,40 (0,18)	216,9 ± 35,9 (16,0)	18,3 ± 8,4 (3,8)	3,3 ± 0,4 (0,2)	1,67 ± 0,26 (0,12)	77,1 ± 20,4 (9,1)	19,7 ± 2,5 (1,1)	3,3 ± 0,4 (0,2)	24,5 ± 6,5 (2,9)	33,84 ± 5,75 (2,57)	4,1 ± 0,6 (0,3)	0,35 ± 0,13 (0,06)
SA25	5,34 ± 0,42 (0,19)	218,9 ± 32,5 (14,6)	149,3 ± 246,3 (110,3)	2,1 ± 1,4 (0,6)	1,44 ± 0,33(0,15)	66,7 ± 28,3 (12,7)	28,6 ± 8,9 (4,0)	4,5 ± 5,3 (2,4)	24,9 ± 3,8 (1,7)	12,36 ± 4,18 (1,87)	5,3 ± 1,5 (0,7)	0,37 ± 0,14 (0,06)

Atributos Químicos									Atributos Físicos		
	SB	t	T	Al ³⁺⁽³⁾	H+Al	V	m	MO	Argila	Silte	Areia
	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	%	%	dag/kg ⁻¹	%	%	%
Z4	5,28 ± 1,6 (0,73)	5,40 ± 1,5 (0,70)	10,96 ± 1,6 (0,72)	0,12 ± 0,11 (0,05)	5,7 ± 2,4 (1,1)	49,2 ± 16,1 (7,2)	2,8 ± 3,2 (1,5)	3,3 ± 0,3 (0,2)	55,2 ± 3,4 (1,5)	14,6 ± 2,9 (1,3)	30,2 ± 3,6 (1,6)
Z5	4,89 ± 1,36 (0,61)	4,99 ± 1,36 (0,61)	9,07 ± 0,48 (0,22)	0,10 ± 0,00 (0,0)	4,9 ± 1,5 (0,7)	54,2 ± 15,6 (6,9)	2,1 ± 0,6 (0,3)	3,4 ± 0,4 (0,2)	58,4 ± 2,4 (1,1)	15,80 ± 3,8 (1,7)	25,8 ± 5,1 (2,3)
GA	3,41 ± 0,98 (0,44)	3,45 ± 1,03 (0,46)	7,37 ± 1,03 (0,47)	0,04 ± 0,05 (0,02)	3,9 ± 1,7 (0,7)	47,7 ± 17,6 (7,9)	0,9 ± 1,2 (0,6)	2,8 ± 0,3 (0,2)	55,6 ± 1,7 (0,8)	12 ± 2,7 (1,2)	32,4 ± 3,5 (1,6)
BU	7,23 ± 0,99 (0,44)	7,29 ± 1,01 (0,45)	10,45 ± 1,68 (0,75)	0,06 ± 0,06 (0,02)	3,2 ± 1,2 (0,5)	69,9 ± 8,4 (3,7)	0,8 ± 0,8 (0,3)	4,0 ± 1,2 (0,6)	60 ± 2,8 (1,3)	15,8 ±5,5 (2,5)	24,2 ± 5,8 (2,6)
BII	4,48 ± 1,14 (0,51)	4,5 ± 1,13 (0,51)	7,38 ± 0,82 (0,37)	0,02 ± 0,05 (0,02)	2,9 ± 0,9 (0,4)	60,5 ± 12,7 (5,6)	0,5 ± 1,0 (0,5)	2,5 ± 0,5 (0,2)	50,4 ± 3,1 (1,4)	14,8 ± 4,6 (2,0)	34,8 ± 6,1 (2,7)
BIII	5,22 ± 0,77 (0,34)	5,26 ± 0,80 (0,36)	8,5 ± 0,60 (0,27)	0,04 ± 0,05 (0,02)	3,3 ± 1,0 (0,5)	61,7 ± 10,5 (4,7)	0,7 ± 0,9 (0,4)	2,9 ± 0,5 (0,2)	46,8 ± 6,7 (2,9)	16,6 ± 2,5 (1,1)	36,6 ± 3,6 (3,6)
CA20	3,83 ± 1,11 (0,5)	3,89 ± 1,13 (0,51)	7,21 ± 1,14 (0,51)	0,06 ± 0,06 (0,02)	3,4 ± 0,9 (0,4)	52,8 ± 12,5 (5,6)	1,5 ± 1,4 (0,6)	2,2 ± 0,4 (0,2)	41,4 ± 3,7 (1,7)	12,0 ± 1,6 (0,7)	48,6 ± 3,7 (1,6)
CA16	4,91 ± 1,19 (0,53)	4,97 ± 1,22 (0,55)	7,95 ± 0,94 (0,42)	0,06 ± 0,06 (0,02)	3,0 ± 1,0 (0,5)	61,8 ± 11,9 (5,3)	1,1 ± 1,0 (0,5)	2,3 ± 0,3 (0,1)	46,6 ± 2,1 (0,9)	14,2 ± 4,4 (1,9)	39,2 ± 5,4 (2,4)
SA29	5,53 ± 0,70 (0,31)	5,61 ± 0,72 (0,32)	10,25 ± 0,87 (0,39)	0,08 ± 0,08 (0,04)	4,7 ± 1,2 (0,5)	54,4 ± 9,0 (4,0)	1,4 ± 1,5 (0,7)	3,4 ± 0,6 (0,3)	45,0 ± 13,4 (6,0)	23,2 ± 8,1 (3,6)	31,8 ± 7,8 (3,5)
SA25	4,05 ± 1,78 (0,8)	4,07 ± 1,82 (0,81)	7,67 ± 1,27 (0,57)	0,02 ± 0,05 (0,02)	3,6 ± 0,6 (0,3)	51,3 ± 13,0 (5,8)	0,3 ± 0,6 (0,3)	2,7 ± 0,4 (0,2)	46,2 ± 1,8 (0,8)	18,6 ± 5,2 (2,3)	35,2 ± 6,6 (2,9)

pH: acidez ativa. Macronutrientes K, P, Ca, Mg, S, P-rem. Micronutrientes Zn, Fe, Mn, Cu, B. SB: soma de bases, t: capacidade efetiva de troca catiônica, T: capacidade Potencial de troca catiônica. H+Al: acidez potencial, Al trocável; Acidez trocável. V: saturação por bases, m: percentual de saturação de alumínio, MO: matéria orgânica. Textura em %. Médias obtidas de um valor n = 5, Desvio padrão SD, Erro padrão SE.

Tabela C

Atributos físicos e químicos dos talões de maior e menor produtividade coletadas no período úmido.

	Atributos Químicos											
	pH H ₂ O ⁽¹⁾	K ⁽²⁾	P ⁽²⁾	Ca ²⁺⁽³⁾	Mg ²⁺⁽³⁾	S	P-Rem	Zn ⁺²	Fe ⁺²	Mn	Cu	B
		mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	cmolc/dm ⁻³	cmolc/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/L ⁻¹	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³
Z4	6,0 ± SD 0,3 SE (0,1)	163,3 ± 40,8 (18,3)	24,4 ± 10,3 (4,6)	3,9 ± 0,8 (0,3)	1,5 ± 0,3 (0,1)	22,0 ± 11,8 (5,3)	31,5 ± 3,6 (1,6)	4,1 ± 2,0 (0,9)	28,2 ± 8,5 (3,8)	11,3 ± 5,9 (2,6)	3,00 ± 0,8 (0,4)	0,26 ± 0,09 (0,04)
Z5	6,1 ± 0,5 (0,2)	90,2 ± 18,7 (8,4)	23,2 ± 9,4 (4,2)	3,8 ± 1,8 (0,8)	1,6 ± 0,8 (0,36)	22,9 ± 15,1 (6,8)	34,2 ± 3,3 (1,5)	3,6 ± 1,9 (0,9)	22,8 ± 3,9 (1,7)	6,3 ± 2,1 (0,9)	3,1 ± 0,6 (0,3)	0,33 ± 0,16 (0,07)
GA	6,3 ± 0,2 (0,1)	88,4 ± 22,2 (9,9)	63 ± 34,6 (15,5)	2,5 ± 0,8 (0,3)	2,3 ± 0,9 (0,4)	55,9 ± 19,2 (8,6)	29,1 ± 4,4 (2,0)	4,9 ± 3,1 (1,4)	21,2 ± 3,4 (1,5)	5,1 ± 2,4 (1,1)	3,6 ± 0,7 (0,3)	0,2 ± 0,11 (0,05)
BU	6,0 0,2 ± (0,1)	112,2 ± 67,6 (30,2)	70,1 ± 67,6 (30,3)	4,1 ± 1,6 (0,7)	1,9 ± 0,3 (0,2)	46,4 ± 10,8 (4,8)	27,4 ± 3,4 (1,5)	5,3 ± 2,6 (1,1)	20,7 ± 3,6 (1,6)	6,6 ± 3,4 (1,5)	3,3 ± 1,0 (0,4)	0,22 ± 0,05 (0,03)
BII	7,0 ± 0,3 (0,1)	172,2 ± 80,5 (36,0)	74,8 ± 44,0 (19,7)	4,2 ± 0,8 (0,4)	2,4 ± 0,4 (0,2)	52,8 ± 26,0 (11,6)	34,9 ± 5,4 (2,4)	3,9 ± 1,7 (0,8)	17,3 ± 1,9 (0,9)	7,5 ± 2,3 (1,0)	2,9 ± 0,9 (0,4)	0,38 ± 0,12 (0,06)
BIII	6,9 ± 0,4 (0,2)	184,6 ± 64,1 (28,7)	113,6 ± 98,5 (44,1)	4,2 ± 2,0 (0,9)	2,1 ± 0,6 (0,3)	13,8 ± 17,7 (8,0)	34,1 ± 11,1 (5,0)	6,8 ± 6,2 (2,8)	28,2 ± 8,8 (3,9)	7,9 ± 4,0 (1,8)	3,0 ± 0,6 (0,3)	0,29 ± 0,13 (0,06)
CA20	6,7 ± 0,2 (0,1)	97,8 ± 15,5 (6,9)	49,1 ± 27,1 (12,1)	2,6 ± 0,5 (0,2)	1,4 ± 0,3 (0,1)	23,1 ± 7,3 (3,3)	28,7 ± 4,0 (1,8)	5,3 ± 1,8 (0,8)	22,8 ± 3,4 (1,5)	3,5 ± 0,9 (0,4)	2,4 ± 0,4 (0,2)	0,24 ± 0,09 (0,04)
CA16	6,4 ± 0,2 (0,1)	84,7 ± 42,3 (18,9)	61,9 ± 26,2 (11,7)	3,5 ± 0,7 (0,3)	1,1 ± 0,3 (0,1)	17,8 ± 10,3 (4,6)	30,6 ± 5,3 (2,4)	7,6 ± 3,7 (1,7)	23,8 ± 8,6 (3,8)	6,5 ± 1,9 (0,8)	4,2 ± 1,6 (0,7)	0,12 ± 0,08 (0,04)
SA29	6,0 ± 0,3 (0,1)	98,8 ± 32,2 (14,4)	19,4 ± 7,3 (3,3)	3,6 ± 0,7 (0,3)	1,7 ± 0,6 (0,3)	32,7 ± 11,9 (5,3)	27,9 ± 3,8 (1,7)	2,2 ± 0,4 (0,2)	34,4 ± 5,1 (2,3)	20,4 ± 5,2 (2,3)	3,9 ± 0,5 (0,2)	0,27 ± 0,02 (0,01)
SA25	6,3 ± 0,2 (0,1)	81,6 ± 16,1 (7,2)	27,5 ± 13,4 (6,0)	1,5 ± 0,6 (0,3)	1 ± 0,4 (0,2)	30,1 ± 10,9 (4,9)	31,2 ± 6,8 (3,0)	1,1 ± 0,5 (0,2)	33,7 ± 7,8 (3,5)	7,5 ± 6,1 (2,7)	4,8 ± 1,4 (0,6)	0,47 ± 0,32 (0,14)

	Atributos Químicos								Atributos Físicos		
	SB	t	T	Al ³⁺⁽³⁾	H+Al	V	m	MO	Argila	Silte	Areia
	cmolc/dm ⁻³	cmolc/dm ⁻³	cmolc/dm ⁻³	cmolc/dm ⁻³	cmolc/dm ⁻³	%	%	dag/kg ⁻¹	%	%	%
Z4	5,8 ± 1,1 (0,5)	5,9 ± 1,1 (0,5)	9,1 ± 1,5 (0,7)	0,16 ± 0,06 (0,02)	3,4 ± 1,3 (0,6)	63,9 ± 12,3 (5,5)	2,8 ± 1,3 (0,6)	3,2 ± 0,7 (0,3)	53,4 ± 3,1 (1,4)	14,2 ± 1,3 (0,6)	32,4 ± 2,8 (1,3)
Z5	5,6 ± 2,6 (1,1)	5,8 ± 2,5 (1,1)	10,2 ± 2,6 (1,2)	0,22 ± 0,11 (0,05)	4,6 ± 1,1 (0,5)	52,8 ± 13,7 (6,1)	4,9 ± 4,7 (2,1)	3,7 ± 0,7 (0,3)	54,4 ± 2,1 (0,9)	17,0 ± 2,3 (1,3)	28,6 ± 4,3 (1,9)
GA	5,0 ± 1,5 (0,7)	5,1 ± 1,5 (0,7)	7,9 ± 1,1 (0,5)	0,1 ± 0 (0)	2,9 ± 0,7 (0,3)	61,9 ± 12,0 (5,4)	2,1 ± 0,6 (0,3)	2,5 ± 0,2 (0,1)	48,8 ± 2,4 (1,1)	18,2 ± 2,9 (1,3)	33 ± 4,0 (1,8)
BU	6,1 ± 1,9 (0,9)	6,3 ± 1,9 (0,9)	10,5 ± 2,7 (1,2)	0,16 ± 0,05 (0,02)	4,4 ± 1,4 (0,6)	57,3 ± 8,8 (3,9)	2,8 ± 1,4 (0,6)	3,7 ± 0,8 (0,3)	50,8 ± 2,6 (1,2)	20 ± 3,8 (1,7)	29,2 ± 4,1 (1,8)
BII	6,9 ± 1,32 (0,59)	7,1 ± 1,3 (0,6)	8,2 ± 1,5 (0,7)	0,1 ± 0 (0)	1,2 ± 0,2 (0,1)	85,0 ± 2,9 (1,3)	1,4 ± 0,3 (0,1)	2,5 ± 1,1 (0,5)	48,6 ± 4,8 (2,2)	14,2 ± 5,4 (2,4)	37,2 ± 5,2 (2,3)
BIII	6,7 ± 2,7 (1,2)	6,9 ± 2,7 (1,2)	9,3 ± 3,4 (1,5)	0,12 ± 0,05 (0,02)	2,5 ± 1,9 (0,9)	73,8 ± 14,3 (6,4)	1,9 0,6 (0,3)	2,5 ± 0,7 (0,3)	50 ± 5,0 (2,2)	14,2 ± 1,6 (0,7)	35,8 ± 5,7 (2,6)
CA20	4,1 ± 0,8 (0,4)	4,3 ± 0,8 (0,46)	5,9 ± 0,7 (0,3)	0,1 ± 0 (0,00)	1,7 ± 0,3 (0,1)	70,1 ± 0,90 (3,1)	2,4 ± 0,6 (0,3)	2,1 ± 0,5 (0,2)	43,8 ± 5,1 (2,3)	7,6 ± 1,3 (0,6)	48,6 ± 4,4 (1,9)
CA16	4,8 ± 1,0 (0,5)	5,0 ± 1,1 (0,5)	8,24 ± 1,0 (0,5)	0,1 ± 0 (0)	3,5 ± 1,3 (0,6)	58,3 ± 12,5 (5,6)	2,1 ± 0,5 (0,2)	2,5 ± 0,5 (0,2)	49,8 ± 5,5 (2,5)	9,8 ± 2,4 (1,1)	40,4 ± 6,8 (3,1)
SA29	5,5 ± 1,3 (0,6)	5,7 ± 1,3 (0,6)	10,1 ± 2,3 (1,0)	0,14 ± 0,05 (0,02)	4,6 ± 1,3 (0,6)	54,8 ± 7,9 (3,5)	2,7 ± 1,4 (0,6)	3,5 ± 0,4 (0,2)	53,8 ± 3,1 (1,4)	15,0 ± 3,8 (1,7)	31,2 ± 6,0 (2,7)
SA25	2,7 ± 0,9 (0,4)	2,8 ± 0,8 (0,4)	5,9 ± 1,0 (0,5)	0,18 ± 0,13 (0,06)	3,2 ± 1,0 (0,5)	45,8 ± 13,5 (6,0)	7,8 ± 8,2 (3,7)	2,4 ± 0,4 (0,2)	48,4 ± 3,3 (1,5)	15,8 ± 5,3 (2,4)	35,8 ± 7,9 (3,5)

pH: acidez ativa. Macronutrientes K, P, Ca, Mg, S, P-rem. Micronutrientes Zn, Fe, Mn, Cu, B. SB: soma de bases, t: capacidade efetiva de troca catiônica, T: capacidade Potencial de troca catiônica. H+Al: acidez potencial, Al trocável; Acidez trocável. V: saturação por bases, m: percentual de saturação de alumínio, MO: matéria orgânica. Textura em %. Médias obtidas de um valor n = 5, Desvio padrão SD, Erro padrão SE.

CAPÍTULO III

Tabela E. Classes de interpretação de fertilidade no sistema de manejo de café convencional, regenerativo e floresta na estação seca, município Patrocínio, período 2022.

Sistema	Atributos Químicos											
	pH H ₂ O ⁽¹⁾	K ⁽²⁾	P ⁽²⁾	Ca ²⁺ (3)	Mg ²⁺ (3)	S	P-Rem	Zn ⁺²	Fe ⁺²	Mn	Cu	B
		mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	cmol ₃ /dm ⁻³	cmol ₃ /dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/L ₁	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³
C1	5,32	247,9	203,73	10,15	2,92	298,36	43,64	7,82	39,22	45,22	3,09	1,04
C2	4,88	165,65	109,94	3,44	1,64	190,64	28,78	2,3	28,36	8,4	2,28	0,82
F-C1C2	5,18	185,1	6,33	5,9	2,58	4,08	26,44	2,22	21,36	91,52	0,5	0,26
R1	4,94	228,67	62,32	3,47	1,65	200,42	25,48	3,56	26,14	6,96	3,69	0,37
R2	5,06	157,03	30,43	2,75	1,68	187,94	21,92	1,98	22,9	5,54	3,57	0,4
F-R1R2	5	108	0,12	1,05	0,91	3,28	18,92	0,7	47,54	15,54	1,67	0,2
C3	5,26	118,89	26,87	3,09	0,93	64,91	18,12	6,04	36,58	7,2	4,99	0,11
C4	5,92	114,29	149,29	5	1,78	58,74	24,32	13,46	50,72	14,4	3,97	0,25
F-C3C4	5,04	154,68	1,57	0,17	0,17	4,4	9,68	0,62	138,56	7,94	1,16	0,04
R3	5,68	241,11	131,39	6,28	1,58	40,54	26,62	15,12	30,82	17,76	7,14	0,2
R4	6,04	418,58	109,91	6,4	1,65	26,42	26,72	48,96	39,48	23,98	9,98	0,17
F-R3R4	5,18	60,65	0,91	0,2	0,19	3,22	14,66	0,72	121,52	2,24	0,47	0,1
C5	5,34	171,67	69,83	2,92	2,01	90,1	28,48	2,68	36,86	11,14	3,42	0,39
C6	4,98	130,93	52,01	2	1,41	112,98	23,02	2,6	34,13	7,48	3,88	0,41
F-C5C6	4,68	68,04	0,12	0,18	0,27	2,06	16,3	0,78	86,86	26,1	2,27	0,13
R5	5,36	277,18	22,27	3,46	1,62	90,98	22,22	4,84	21,04	9,7	6,05	0,32
R6	5,42	244,46	36,43	3,49	1,7	91,8	21,54	5,28	20,26	9,3	4,29	0,29
F-R5R6	4,72	112,58	2,23	0,97	0,87	3,1	22,32	1,02	93,69	31,52	2,12	0,14

Sistema	Atributos Químicos									Atributos Físicos		
	SB	t	T	Al ³⁺ (3)	H+Al	V	m	MO		Argila	Silte	Areia
	cmol ₃ /dm ⁻³	cmol ₃ /dm ⁻³	cmol ₃ /dm ⁻³	cmol ₃ /dm ⁻³	cmol ₃ /dm ⁻³	%	%	dag/kg ₁		%	%	%
C1	13,71	13,85	16,35	0,14	2,64	83,5	0,98	5,86		43,2	24,4	32,4
C2	5,5	5,74	11,04	0,24	5,54	50,13	4,8	3,41		36,6	30,4	33
F-C1C2	8,95	9,59	16,55	0,64	7,6	51,28	13,08	12,61		31,8	30,8	37,4
R1	5,71	5,83	11,01	0,12	5,3	51,59	2,16	4,9		56,4	26,6	17
R2	4,83	4,97	9,79	0,14	4,96	49,32	3,31	4,01		59,2	23	17,8
F-R1R2	2,24	2,74	9,36	0,5	7,12	23,47	20,84	4,9		58,2	23,8	18
C3	5,12	4,46	10,04	0,14	5,72	43,51	3,39	4,79		37,8	33,2	29
C4	7,07	7,19	10,79	0,12	3,72	65,63	1,65	4,34		51,2	40,6	8,2
F-C3C4	0,58	2,6	13,96	2,02	13,38	4,21	77,25	7,46		32,6	28,6	38,8
R3	8,63	8,81	12,79	0,18	4,16	67,53	2,03	6,72		48,2	39,2	12,6
R4	9,12	9,26	13,08	0,14	3,96	69,78	1,49	5,96		45	40,2	14,8
F-R3R4	0,55	2,33	13,67	1,78	11,32	4,1	74,94	7,28		26,4	43	30,6
C5	5,37	5,47	9,25	0,1	3,88	58,06	1,85	3,64		54,6	27	18,4
C6	3,75	4,03	9,31	0,28	5,56	40,27	7,38	3,58		54,8	26	19,2
F-C5C6	0,69	2,13	9,17	1,5	8,54	7,33	70,32	4,06		39,4	28,4	32,2
R5	5,79	5,91	10,17	0,12	4,38	56,71	2,04	3,85		56,6	26,8	16,6
R6	5,82	5,92	9,38	0,1	3,56	61,52	1,77	3,35		54,8	27,2	18
F-R5R6	2,14	3,36	11,22	1,22	9,08	18,23	43,16	6,23		42,6	33	24,4

Classes de fertilidade do solo, de acordo valores de referência dos atributos químicos para o cafeeiro descritos por Mesquita et al. (2016), e pelo manual de recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes de solo em Minas Gerais, conforme Guimarães et al., (1999). Sendo Azul, Muito Bom; Verde, Bom; Amarelo, Medio; Vermelho, Baixo ou Muito Baixo.

Tabela F. Classes de interpretação de fertilidade no sistema de manejo de café convencional, regenerativo e floresta na estação úmida, município Patrocínio, período 2023.

Atributos Químicos												
Sistema	pH H ₂ O ⁽¹⁾	K ⁽²⁾	P ⁽²⁾	Ca ²⁺ (3)	Mg ²⁺ (3)	S	P-Rem	Zn ⁺²	Fe ⁺²	Mn	Cu	B
		mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/L ₁	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³	mg/dm ⁻³
C1	5,1	180,38	50,99	4,09	1,25	126,28	28,92	1,56	37,32	12,56	2,8	0,57
C2	4,54	139,08	86,47	2,12	0,67	147,08	22,98	1,08	36,94	7,66	2,42	0,27
F-C1C2	5,44	172,71	10,39	6,58	1,9	6,02	30,46	1,84	27,58	83,54	0,33	0,15
R1	4,72	240,56	13,99	1,6	0,74	158,22	19,18	1,3	27,28	4,42	3,35	0,31
R2	4,68	171,28	10,92	1,32	0,59	226	15,44	1,02	25,88	3,88	2,97	0,29
F-R1R2	4,88	113,91	0,12	0,78	0,64	4,5	15,14	0,56	66,78	15,04	2,03	0,14
C3	4,98	143,6	23,53	3,53	1,17	75,84	17,12	6,34	32,98	6,58	4,71	0,15
C4	5,88	227,74	80,72	4,63	2,12	22,96	26,26	11,12	30,8	9,92	3,36	0,09
F-C3C4	4,8	95,73	2,17	0,2	0,15	4,56	10,26	0,64	123,62	6,4	0,76	0,08
R3	5,72	375,03	68,1	5,7	1,63	37,68	25,7	11,94	29,86	13,36	5,35	0,31
R4	5,74	419,91	78,14	6,08	1,58	10,6	26,32	35,76	28,76	15,8	7,45	0,34
F-R3R4	4,9	59,06	1,98	0,2	0,12	3,54	14,22	0,72	87,62	3,22	0,29	0,07
C5	5,22	365,25	78,18	2,66	3,07	59,66	28,1	2,48	39,8	12,9	3,32	0,27
C6	5	287,43	113,75	2,85	2,46	69,88	29,06	3,24	36,4	10,8	4,81	0,58
F-C5C6	4,8	93,33	1,52	0,22	0,26	2,66	15,38	0,96	115,4	38,5	2,34	0,13
R5	5,6	394,75	58,92	4,22	2,38	49,56	24,64	5,48	20,68	12,18	7,67	0,42
R6	5,5	279,28	82,9	5,21	2,49	50,04	20,28	8	24,6	18,36	6,44	0,52
F-R5R6	4,62	124,18	3,7	0,68	0,7	5,16	17,56	1	119,16	51,72	2,37	0,27

Atributos Químicos									Atributos Físicos		
Sistema	SB	t	T	Al ³⁺ (3)	H+Al	V	m	MO	Argila	Silte	Areia
	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	%	%	dag/kg ₁	%	%	%
C1	5,8	5,94	9,32	0,14	3,52	62,3	2,46	3,19	48,6	20	31,4
C2	3,14	4,08	9,42	0,94	6,28	33,81	26,63	3,04	48,6	18	33,4
F-C1C2	8,93	9,45	14,65	0,52	5,72	57,03	9,71	10,96	29,8	37,6	32,6
R1	2,96	3,24	7,56	0,28	4,6	39,25	9,31	3,38	54	30	16
R2	2,35	2,93	7,07	0,58	4,72	35,36	19,68	3,18	52,8	31,8	15,4
F-R1R2	1,71	2,41	7,91	0,7	6,2	21,22	30,98	4,62	57,8	25	17,2
C3	5,08	5,28	9,34	0,2	4,26	54,98	4,35	4,47	44,2	27,4	28,4
C4	7,33	7,43	10,07	0,1	2,74	72,6	1,36	4,35	53,8	37,8	8,4
F-C3C4	0,6	3,22	13,16	2,62	12,56	4,58	81,37	7,24	30,8	31,8	37,4
R3	8,29	8,39	12,29	0,1	4	67,33	1,21	5,97	50,4	37,2	12,4
R4	8,74	8,84	11,78	0,1	3,04	74,23	1,13	5,17	43,6	41,8	14,6
F-R3R4	0,48	2,98	13,84	2,5	13,36	3,58	83,07	9,2	38,6	36	25,4
C5	6,67	6,81	10,97	0,14	4,3	59,94	2,44	3,4	54,6	29,2	16,2
C6	6,05	6,21	11,27	0,16	5,22	53,73	2,83	3,42	52,8	31,2	16
F-C5C6	0,72	2,9	11,42	2,18	10,7	6,47	75,01	4,29	40,2	29,8	30
R5	7,61	7,73	11,39	0,12	3,78	66,54	1,56	3,86	53,2	29,6	17,2
R6	8,42	8,54	11,54	0,12	3,12	72,93	1,39	3,73	50,8	33,2	16
F-R5R6	1,7	3,42	13,8	1,72	12,1	12,28	50,87	5,22	43	33	24

Classes de fertilidade do solo, de acordo valores de referência dos atributos químicos para o cafeeiro descritos por Mesquita et al. (2016), e pelo manual de recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes de solo em Minas Gerais, conforme Guimarães et al., (1999). Sendo Azul, Muito Bom; Verde, Bom; Amarelo, Medio; Vermelho, Baixo ou Muito Baixo.

Tabela G. Atributos químicos e físicos do solo, no sistema de café convencional, regenerativo e floresta na estação seca, município Patrocinio, no período 2022.

	Atributos Químicos											
	pH H ₂ O ⁽¹⁾	K ⁽²⁾ mg/dm ⁻³	P ⁽²⁾ mg/dm ⁻³	Ca ²⁺⁽³⁾ cmol _c /dm ⁻³	Mg ²⁺⁽³⁾ cmol _c /dm ⁻³	S mg/dm ⁻³	P-Rem mg/L ¹	Zn ⁺² mg/dm ⁻³	Fe ⁺² mg/dm ⁻³	Mn mg/dm ⁻³	Cu mg/dm ⁻³	B mg/dm ⁻³
C1	5,32 0,07ES	247,9 28,13	203,73 12,81	10,15 0,95	2,92 0,15	298,36 42,58	43,64 3,52	7,82 1,08	39,22 1,7	45,22 9	3,09 0,12	1,04 0,29
C2	4,88 0,1	165,65 4,89	109,94 7,33	3,44 0,38	1,64 0,23	190,64 15,16	28,78 1,24	2,3 0,46	28,36 1,63	8,4 1,24	2,28 0,19	0,82 0,04
F-C1C2	5,18 0,25	185,1 27,19	6,33 1,82	5,9 2,01	2,58 0,65	4,08 0,22	26,44 2,61	2,22 0,45	21,36 4,4	91,52 18,55	0,5 0,12	0,26 0,09
R1	4,94 0,04	228,67 25,4	62,32 10,03	3,47 0,3	1,65 0,1	200,42 6,08	25,48 1,2	3,56 0,53	26,14 1,06	6,96 0,64	3,69 0,14	0,37 0,05
R2	5,06 0,15	157,03 11,09	30,43 4,81	2,75 0,41	1,68 0,22	187,94 22,45	21,92 1,59	1,98 0,25	22,9 0,61	5,54 0,83	3,57 0,1	0,4 0,06
F-R1R2	5 0,08	108 11,88	0,12 0,01	1,05 0,24	0,91 0,13	3,28 0,29	18,92 0,75	0,7 0,05	47,54 1,54	15,54 1,9	1,67 0,06	0,2 0,05
C3	5,26 0,11	118,89 3,39	26,87 6,77	3,09 0,33	0,93 0,14	64,91 17,37	18,12 1,27	6,04 0,51	36,58 2,51	7,2 0,7	4,99 0,26	0,11 0,01
C4	5,92 0,07	114,29 6,78	149,29 16,32	5 0,22	1,78 0,04	58,74 12,07	24,32 0,65	13,46 0,7	50,72 2,34	14,4 1,25	3,97 0,15	0,25 0,03
F-C3C4	5,04 0,05	154,68 62,34	1,57 0,68	0,17 0,01	0,17 0	4,4 0,39	9,68 0,78	0,62 0,07	138,56 13,93	7,94 3,39	1,16 0,12	0,04 0,01
R3	5,68 0,1	241,11 66,39	131,39 58,16	6,28 0,16	1,58 0,07	40,54 8,96	26,62 1,07	15,12 1,32	30,82 0,9	17,76 0,44	7,14 0,52	0,2 0,02
R4	6,04 0,12	418,58 23,81	109,91 9,63	6,4 0,28	1,65 0,13	26,42 10,42	26,72 1,05	48,96 0,95	39,48 2,08	23,98 2,26	9,98 0,3	0,17 0,02
F-R3R4	5,18 0,15	60,65 9,46	0,91 0,41	0,2 0,03	0,19 0,03	3,22 0,4	14,66 1,66	0,72 0,07	121,52 25,8	2,24 0,65	0,47 0,18	0,1 0,05
C5	5,34 0,07	171,67 18,51	69,83 7,04	2,92 0,19	2,01 0,13	90,1 5,5	28,48 1,19	2,68 0,16	36,86 1,32	11,14 0,76	3,42 0,24	0,39 0,07
C6	4,98 0,06	130,93 11,59	52,01 3,97	2 0,16	1,41 0,12	112,98 7,65	23,02 0,71	2,6 0,26	34,13 6,86	7,48 0,41	3,88 0,11	0,41 0,04
F-C5C6	4,68 0,09	68,04 7,69	0,12 0,01	0,18 0,02	0,27 0,03	2,06 0,44	16,3 1,72	0,78 0,07	86,86 7,53	26,1 1,31	2,27 0,08	0,13 0,09
R5	5,36 0,07	277,18 24,89	22,27 3,7	3,46 0,25	1,62 0,15	90,98 5,44	22,22 0,75	4,84 0,49	21,04 0,53	9,7 0,54	6,05 0,16	0,32 0,03
R6	5,42 0,1	244,46 10,28	36,43 10,39	3,49 0,41	1,7 0,2	91,8 8,54	21,54 1,31	5,28 0,33	20,26 0,8	9,3 1,3	4,29 0,1	0,29 0,02
F-R5R6	4,72 0,09	112,58 10,83	2,23 2,06	0,97 0,52	0,87 0,32	3,1 0,44	22,32 2,39	1,02 0,24	93,69 10,93	31,52 7,03	2,12 0,12	0,14 0,03

	Atributos Químicos								Atributos Físicos		
	SB cmol _c /dm ⁻³	t cmol _c /dm ⁻³	T cmol _c /dm ⁻³	Al ³⁺⁽³⁾ cmol _c /dm ⁻³	H+Al cmol _c /dm ⁻³	V %	m %	MO dag/kg ⁻¹	Argila %	Silte %	Areia %
C1	13,71 1,12	13,85 1,14	16,35 1,05	0,14 0,02	2,64 0,2	83,5 1,84	0,98 0,1	5,86 0,68	43,2 1,32	24,4 1,29	32,4 0,51
C2	5,5 0,59	5,74 0,51	11,04 0,3	0,24 0,1	5,54 0,38	50,13 3,82	4,8 2,28	3,41 0,31	36,6 8,65	30,4 8,48	33 1
F-C1C2	8,95 2,64	9,59 2,38	16,55 1,74	0,64 0,34	7,6 1,49	51,28 11,85	13,08 9,06	12,61 2,74	31,8 2,48	30,8 2,18	37,4 2,52
R1	5,71 0,43	5,83 0,42	11,01 0,39	0,12 0,02	5,3 0,13	51,59 2,18	2,16 0,5	4,9 0,25	56,4 0,51	26,6 0,87	17 0,55
R2	4,83 0,62	4,97 0,59	9,79 0,41	0,14 0,04	4,96 0,6	49,32 5,65	3,31 1,39	4,01 0,18	59,2 1,39	23 1,64	17,8 0,37
F-R1R2	2,24 0,39	2,74 0,32	9,36 0,32	0,5 0,07	7,12 0,12	23,47 3,49	20,84 5,53	4,9 0,24	58,2 2,11	23,8 2,4	18 0,45
C3	5,12 1,02	4,46 0,44	10,04 0,51	0,14 0,02	5,72 0,71	43,51 4,71	3,39 0,83	4,79 0,24	37,8 3,07	33,2 2,48	29 4,68
C4	7,07 0,24	7,19 0,25	10,79 0,16	0,12 0,02	3,72 0,35	65,63 2,82	1,65 0,23	4,34 0,23	51,2 1,46	40,6 1,29	8,2 0,73
F-C3C4	0,58 0,02	2,6 0,19	13,96 0,72	2,02 0,18	13,38 0,71	4,21 0,15	77,25 1,17	7,46 0,77	32,6 1,69	28,6 2,82	38,8 3,44
R3	8,63 0,28	8,81 0,3	12,79 0,44	0,18 0,02	4,16 0,2	67,53 0,83	2,03 0,2	6,72 0,42	48,2 1,62	39,2 1,59	12,6 0,51
R4	9,12 0,43	9,26 0,45	13,08 0,29	0,14 0,02	3,96 0,43	69,78 3,06	1,49 0,22	5,96 0,2	45 1,41	40,2 1,02	14,8 1,28
F-R3R4	0,55 0,08	2,33 0,24	13,67 0,59	1,78 0,28	11,32 2,41	4,1 0,76	74,94 5,31	7,28 0,55	26,4 7,76	43 7,92	30,6 6,86
C5	5,37 0,31	5,47 0,31	9,25 0,31	0,1 0	3,88 0,29	58,06 2,75	1,85 0,11	3,64 0,29	54,6 0,87	27 1,14	18,4 0,51
C6	3,75 0,31	4,03 0,25	9,31 0,03	0,28 0,06	5,56 0,31	40,27 3,3	7,38 1,83	3,58 0,15	54,8 0,86	26 1	19,2 0,8
F-C5C6	0,69 0,04	2,13 0,08	9,17 1,04	1,5 0,08	8,54 1,05	7,33 1,12	70,32 2,39	4,06 0,4	39,4 3,26	28,4 2,04	32,2 4,47
R5	5,79 0,42	5,91 0,42	10,17 0,26	0,12 0,02	4,38 0,23	56,71 3,03	2,04 0,3	3,85 0,12	56,6 1,12	26,8 0,97	16,6 0,4
R6	5,82 0,61	5,92 0,61	9,38 0,39	0,1 0	3,56 0,32	61,52 4,56	1,77 0,2	3,35 0,12	54,8 0,86	27,2 1,71	18 1,14
F-R5R6	2,14 0,83	3,36 0,65	11,22 0,42	1,22 0,19	9,08 0,49	18,23 6,18	43,16 9,12	6,23 0,46	42,6 1,54	33 2,83	24,4 2,93

pH: acidez ativa. Macronutrientes K, P, Ca, Mg, S, P-rem. Micronutrientes Zn, Fe, Mn, Cu, B. SB: soma de bases, t: capacidade efetiva de troca catiônica, T: capacidade Potencial de troca catiônica. H+Al: acidez potencial, Al trocável; Acidez trocável. V: saturação por bases, m: % de saturação de alumínio, MO: matéria orgânica. Textura %. Médias obtidas valores n = 5, Erro padrão SE.

Tabela H. Atributos químicos e físicos do solo, no sistema de café convencional, regenerativo e floresta na estação úmida, município Patrocínio, período 2023.

Atributos Químicos													
	pH H ₂ O ⁽¹⁾	K ⁽²⁾ mg/dm ⁻³	P ⁽²⁾ mg/dm ⁻³	Ca ²⁺⁽³⁾ cmol/dm ⁻³	Mg ²⁺⁽³⁾ cmol/dm ⁻³	S mg/dm ⁻³	P-Rem mg/L ⁻¹	Zn ⁺² mg/dm ⁻³	Fe ⁺² mg/dm ⁻³	Mn mg/dm ⁻³	Cu mg/dm ⁻³	B mg/dm ⁻³	
C1	5,1 0,28	180,38 13,45	50,99 4,62	4,09 0,35	1,25 0,21	126,28 35,41	28,92 1,51	1,56 0,31	37,32 4,22	12,56 1,79	2,8 0,38	0,57 0,09	
C2	4,54 0,29	139,08 13,78	86,47 21,45	2,12 0,54	0,67 0,18	147,08 30,27	22,98 2,1	1,08 0,17	36,94 3,24	7,66 1,6	2,42 0,15	0,27 0,06	
F-C1C2	5,44 0,18	172,71 17,37	10,39 2,8	6,58 2,13	1,9 0,44	6,02 1,15	30,46 5,06	1,84 0,22	27,58 6,93	83,54 10,92	0,33 0,2	0,15 0,03	
R1	4,72 0,07	240,56 15,92	13,99 4,11	1,6 0,16	0,74 0,07	158,22 14,21	19,18 1,34	1,3 0,21	27,28 0,71	4,42 0,29	3,35 0,1	0,31 0,03	
R2	4,68 0,14	171,28 5,26	10,92 1,8	1,32 0,14	0,59 0,06	226 20,79	15,44 0,87	1,02 0,21	25,88 0,99	3,88 0,71	2,97 0,22	0,29 0,02	
F-R1R2	4,88 0,11	113,91 10,46	0,12 0,01	0,78 0,14	0,64 0,1	4,5 1,2	15,14 0,79	0,56 0,02	66,78 2,77	15,04 1,66	2,03 0,05	0,14 0,01	
C3	4,98 0,19	143,6 11,37	23,53 2,77	3,53 0,53	1,17 0,17	75,84 13,4	17,12 0,88	6,34 0,68	32,98 1,12	6,58 1,14	4,71 0,32	0,15 0,02	
C4	5,88 0,09	227,74 25,7	80,72 8,15	4,63 0,3	2,12 0,11	22,96 7,37	26,26 0,48	11,12 1,06	30,8 2,09	9,92 1,08	3,36 0,15	0,09 0,01	
F-C3C4	4,8 0,05	95,73 8,04	2,17 0,8	0,2 0,02	0,15 0,01	4,56 0,22	10,26 0,27	0,64 0,09	123,62 9,04	6,4 2,46	0,76 0,08	0,08 0,01	
R3	5,72 0,12	375,03 16,28	68,1 9,48	5,7 0,39	1,63 0,1	37,68 4,8	25,7 0,78	11,94 0,56	29,86 1,44	13,36 1,21	5,35 0,42	0,31 0,03	
R4	5,74 0,08	419,91 18,26	78,14 13,69	6,08 0,27	1,58 0,03	10,6 1,46	26,32 1,14	35,76 2,78	28,76 2,81	15,8 0,86	7,45 0,74	0,34 0,03	
F-R3R4	4,9 0,08	59,06 6,62	1,98 0,78	0,2 0,02	0,12 0,02	3,54 0,46	14,22 1,61	0,72 0,06	87,62 9,36	3,22 0,87	0,29 0,13	0,07 0,01	
C5	5,22 0,24	365,25 16,13	78,18 27,52	2,66 0,6	3,07 0,4	59,66 10,9	28,1 2,15	2,48 0,69	39,8 2,49	12,9 3,11	3,32 0,32	0,27 0,06	
C6	5 0,14	287,43 20,66	113,75 17,27	2,85 0,3	2,46 0,19	69,88 14,44	29,06 2,33	3,24 0,41	36,4 1,47	10,8 0,79	4,81 0,15	0,58 0,09	
F-C5C6	4,8 0,26	93,33 12,37	1,52 0,12	0,22 0,02	0,26 0,03	2,66 0,16	15,38 2,02	0,96 0,1	115,4 12,13	38,5 5,56	2,34 0,26	0,13 0,01	
R5	5,6 0,09	394,75 31,26	58,92 6,31	4,22 0,35	2,38 0,21	49,56 7,81	24,64 1,15	5,48 0,44	20,68 1,02	12,18 1,29	7,67 0,11	0,42 0,02	
R6	5,5 0,18	279,28 27,99	82,9 14,49	5,21 0,39	2,49 0,09	50,04 7,45	20,28 0,77	8 0,72	24,6 0,64	18,36 3,1	6,44 0,36	0,52 0,04	
F-R5R6	4,62 0,06	124,18 7,97	3,7 1,76	0,68 0,18	0,7 0,06	5,16 0,07	17,56 0,73	1 0,07	119,16 11,84	51,72 7,49	2,37 0,08	0,27 0,03	

Atributos Químicos								Atributos Físicos			
SB	t	T	Al ³⁺⁽³⁾	H+Al	V	m	MO	Argila	Silte	Areia	
cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	cmol _c /dm ⁻³	%	%	dag/kg ⁻¹	%	%	%	
C1	5,8 0,53	5,94 0,52	9,32 0,53	0,14 0,02	3,52 0,47	62,3 4,17	2,46 0,51	3,19 0,31	48,6 1,54	20 1,41	31,4 0,51
C2	3,14 0,74	4,08 0,49	9,42 0,23	0,94 0,26	6,28 0,87	33,81 8,63	26,63 8,26	3,04 0,15	48,6 1,12	18 1,52	33,4 1,03
F-C1C2	8,93 2,5	9,45 2,36	14,65 2,11	0,52 0,18	5,72 0,95	57,03 10,46	9,71 5,13	10,96 2,64	29,8 0,92	37,6 2,2	32,6 1,33
R1	2,96 0,26	3,24 0,19	7,56 0,23	0,28 0,07	4,6 0,33	39,25 3,59	9,31 2,99	3,38 0,16	54 0,71	30 0,55	16 0,55
R2	2,35 0,19	2,93 0,11	7,07 0,69	0,58 0,19	4,72 0,86	35,36 5,91	19,68 6,03	3,18 0,15	52,8 0,8	31,8 0,8	15,4 0,24
F-R1R2	1,71 0,25	2,41 0,2	7,91 0,39	0,7 0,05	6,2 0,19	21,22 2,52	30,98 5,96	4,62 0,26	57,8 1,69	25 1,64	17,2 0,37
C3	5,08 0,73	5,28 0,7	9,34 0,53	0,2 0,04	4,26 0,9	54,98 7,89	4,35 1,25	4,47 0,14	44,2 2,03	27,4 4,4	28,4 5,1
C4	7,33 0,44	7,43 0,44	10,07 0,24	0,1 0	2,74 0,27	72,6 2,99	1,36 0,08	4,35 0,21	53,8 1,83	37,8 1,16	8,4 1,17
F-C3C4	0,6 0,05	3,22 0,27	13,16 1,22	2,62 0,23	12,56 1,18	4,58 0,23	81,37 0,9	7,24 1,29	30,8 3,54	31,8 3,6	37,4 3,59
R3	8,29 0,47	8,39 0,47	12,29 0,49	0,1 0	4 0,23	67,33 1,91	1,21 0,06	5,97 0,2	50,4 1,83	37,2 1,71	12,4 0,51
R4	8,74 0,24	8,84 0,24	11,78 0,28	0,1 0	3,04 0,21	74,23 1,52	1,13 0,03	5,17 0,2	43,6 2,04	41,8 1,36	14,6 0,87
F-R3R4	0,48 0,05	2,98 0,28	13,84 1,03	2,5 0,31	13,36 1,06	3,58 0,52	83,07 2,7	9,2 0,67	38,6 8,09	36 3,15	25,4 7,61
C5	6,67 0,99	6,81 0,97	10,97 0,51	0,14 0,02	4,3 0,64	59,94 6,7	2,44 0,73	3,4 0,22	54,6 1,08	29,2 1,16	16,2 0,37
C6	6,05 0,5	6,21 0,47	11,27 0,34	0,16 0,04	5,22 0,51	53,73 4,36	2,83 0,92	3,42 0,15	52,8 0,66	31,2 0,49	16 0,32
F-C5C6	0,72 0,04	2,9 0,17	11,42 0,9	2,18 0,16	10,7 0,89	6,47 0,65	75,01 1,75	4,29 0,41	40,2 2,82	29,8 3,88	30 6,47
R5	7,61 0,61	7,73 0,61	11,39 0,26	0,12 0,02	3,78 0,4	66,54 4,05	1,56 0,21	3,86 0,09	53,2 1,66	29,6 1,44	17,2 1,74
R6	8,42 0,45	8,54 0,46	11,54 0,44	0,12 0,02	3,12 0,31	72,93 2,5	1,39 0,18	3,73 0,32	50,8 1,91	33,2 2,29	16 0,63
F-R5R6	1,7 0,21	3,42 0,16	13,8 0,61	1,72 0,12	12,1 0,55	12,28 1,36	50,87 4,23	5,22 0,65	43 3,11	33 1,82	24 2,9

pH: acidez ativa. Macronutrientes K, P, Ca, Mg, S, P-rem. Micronutrientes Zn, Fe, Mn, Cu, B. SB: soma de bases, t: capacidade efetiva de troca catiônica, T: capacidade Potencial de troca catiônica. H+Al: acidez potencial, Al trocável; Acidez trocável. V: saturação por bases, m: % de saturação de alumínio, MO: matéria orgânica. Textura %. Médias obtidas valores n = 5, Erro padrão SE.

Tabela I. Valores de médias estimadas dos atributos microbiológicos do solo, sistema de café convencional C, sistema regenerativo R, na estação seca e úmida.

Estação	Sistema	CBM	RESP	qCO ₂	Arilsulfaase	β-glicosidase	Fosfatase	Urease	FDA
Seca	C1	331,4	143,6	0,5	154,5	684,8	2602,8	35,8	797,2
Seca	R1	310,2	137,2	0,4	114,4	436,4	2296,0	21,8	279,9
Seca	C2	212,5	123,8	0,9	55,8	163,6	1263,8	18,5	324,5
Seca	R2	146,8	109,5	0,6	118,6	297,9	1809,8	18,8	513,6
Seca	C3	185,6	124,1	0,5	104,8	229,7	1574,7	23,6	226,5
Seca	R3	342,2	159,8	0,7	385,0	654,6	2900,1	54,2	288,1
Seca	C4	91,3	126,0	1,0	196,4	427,3	1742,1	35,7	178,7
Seca	R4	144,6	141,3	1,4	302,2	541,8	2650,2	48,3	326,9
Seca	C5	264,6	46,1	0,1	64,5	322,7	2187,1	35,8	236,6
Seca	R5	407,1	49,0	0,2	93,7	251,9	1440,8	30,8	246,3
Seca	C6	333,3	30,0	0,1	36,3	300,2	1863,7	35,7	228,6
Seca	R6	368,8	30,7	0,1	105,1	229,7	1239,3	28,9	233,5
Chuvosa	C1	319,7	81,9	0,3	38,4	175,5	1113,0	30,6	173,9
Chuvosa	R1	340,5	107,0	0,3	29,4	224,2	1184,8	25,6	164,2
Chuvosa	C2	240,4	63,8	0,3	27,4	122,8	850,9	26,5	158,9
Chuvosa	R2	390,9	109,8	0,3	21,2	170,2	895,5	18,3	141,1
Chuvosa	C3	261,5	68,2	0,3	97,2	190,8	1509,8	23,3	208,2
Chuvosa	R3	519,3	147,9	0,3	222,5	418,0	2333,0	29,0	238,8
Chuvosa	C4	284,6	147,9	0,5	144,1	423,2	1825,2	21,2	224,8
Chuvosa	R4	259,3	77,0	0,3	213,4	356,2	2015,6	22,9	192,6
Chuvosa	C5	427,1	33,6	0,1	70,3	264,4	1221,7	17,6	75,6
Chuvosa	R5	678,3	73,5	0,1	204,5	374,1	2001,1	35,3	204,7
Chuvosa	C6	482,1	12,5	0,0	64,1	330,8	1490,5	15,0	87,8
Chuvosa	R6	614,4	59,8	0,1	145,9	260,3	1488,3	26,1	189,0

As unidades do carbono da biomassa microbiana e das atividades enzimáticas estão apresentadas nas seguintes unidades: CBM, $\mu\text{g C g}^{-1}$ de solo; RESP, $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ de solo d^{-1} ; qCO₂, $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$ CBM d^{-1} ; Arilsulfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; β-glicosidase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Fosfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Urease, $\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; FDA, μg de fluoresceína g^{-1} de solo h^{-1} . Fonte: Autor

Tabela I. Diferença em % estimadas dos atributos microbiológicos do solo, sistema regenerativo R e, sistema de café convencional C, na estação seca e úmida.

Estação	Sistema	CBM	RESP	qCO ₂	Arilsulfaase	β-glicosidase	Fosfatase	Urease	FDA
Seca	R1 - C1	-6,4	-0,2	-6,9	-1,1	-36,3	-11,8	-3,7	-1,4
Seca	R2 - C2	-30,9	0,6	61,4	6,1	82,1	43,2	0,2	1,4
Seca	R3 - C3	84,4	1,2	-30,6	8,9	185,0	84,2	10,6	0,8
Seca	R4 - C4	58,4	0,5	-29,4	1,7	26,8	52,1	2,7	2,6
Seca	R5 - C5	53,8	-0,4	-37,5	2,6	-21,9	-34,1	-1,2	0,1
Seca	R6 - C6	10,7	0,2	13,0	11,6	-23,5	-33,5	-1,7	0,1
Chuvosa	R1 - C1	6,5	1,6	22,0	-2,0	27,8	6,5	-1,5	-0,2
Chuvosa	R2 - C2	62,6	3,9	-0,1	-2,3	38,6	5,2	-3,3	-0,5
Chuvosa	R3 - C3	98,6	5,7	4,6	5,2	119,2	54,5	2,4	0,5
Chuvosa	R4 - C4	-8,9	-2,3	-42,5	1,8	-15,8	10,4	0,9	-0,5
Chuvosa	R5 - C5	58,8	8,3	31,9	8,4	41,5	63,8	10,0	7,4
Chuvosa	R6 - C6	27,4	33,6	338,8	6,3	-21,3	-0,1	8,3	5,0

As unidades do carbono da biomassa microbiana e das atividades enzimáticas estão apresentadas nas seguintes unidades: CBM, $\mu\text{g C g}^{-1}$ de solo; RESP, $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ de solo d^{-1} ; qCO₂, $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$ CBM d^{-1} ; Arilsulfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; β-glicosidase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Fosfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Urease, $\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; FDA, μg de fluoresceína g^{-1} de solo h^{-1} . Fonte: Autor

Tabela J. Valores medias estimadas dos atributos microbiológicos do solo, sistema convencional, regenerativo e floresta, na estação seca.

Estação	Sistema	CBM	RESP	qCO ₂	Arilsulfaase	β-glicosidase	Fosfatase	Urease	FDA
Seca	Coffee_C1	333,6	142,7	0,4	138,1	506,0	2411,2	32,0	688,8
Seca	Coffee_C2	212,0	109,8	0,6	74,2	183,9	1440,9	22,5	427,9
Seca	Forest_C1_C2	792,4	203,1	0,2	1495,5	436,9	3199,3	141,6	720,2
Seca	Coffee_R1	262,6	139,1	0,5	123,4	428,2	2323,8	22,0	369,9
Seca	Coffee_R2	183,6	129,9	0,8	112,8	274,0	1763,4	18,9	457,4
Seca	Forest_R1_R2	678,4	198,6	0,3	1318,9	175,2	2804,8	117,1	534,0
Seca	Coffee_C3	165,0	102,2	0,6	113,8	241,7	1598,0	27,3	222,8
Seca	Coffee_C4	107,0	142,3	1,4	181,0	436,6	1723,9	34,4	188,9
Seca	Forest_C3_C4	571,3	141,4	0,3	920,1	251,0	2671,2	140,7	466,8
Seca	Coffee_R3	368,8	164,6	0,5	367,0	679,8	2962,2	54,0	313,0
Seca	Coffee_R4	117,6	112,1	0,8	313,5	507,5	2524,8	49,5	292,6
Seca	Forest_R3_R4	798,8	150,0	0,2	1301,6	362,9	4105,9	186,1	591,4
Seca	Coffee_C5	274,0	54,5	0,2	57,2	323,0	2090,2	35,6	237,9
Seca	Coffee_C6	313,4	28,3	0,1	38,3	309,7	1962,9	35,6	222,8
Seca	Forest_C5_C6	769,1	68,4	0,1	678,9	139,7	1957,6	180,8	492,8
Seca	Coffee_R5	437,1	52,0	0,1	109,2	317,6	1623,5	32,4	254,8
Seca	Coffee_R6	363,6	36,0	0,1	89,3	224,9	1226,7	28,0	222,9
Seca	Forest_R5_R6	978,7	89,1	0,1	510,9	217,7	1939,0	170,8	456,9

As unidades do carbono da biomassa microbiana e das atividades enzimáticas estão apresentadas nas seguintes unidades: CBM, $\mu\text{g C g}^{-1}$ de solo; RESP, $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ de solo d^{-1} ; qCO₂, $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$ CBM d^{-1} ; Arilsulfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; β-glicosidase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Fosfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Urease, $\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; FDA, μg de fluoresceína g^{-1} de solo h^{-1} ."

Tabela K Valores de medias estimadas dos atributos microbiológicos do solo, sistema convencional, regenerativo e floresta, na estação chuvosa.

Estação	Sistema	CBM	RESP	qCO₂	Arilsulfatase	β-glicosidase	Fosfatase	Urease	FDA
Chuvosa	Coffee_C1	317,5	82,6	0,3	47,2	237,5	1262,4	35,0	283,1
Chuvosa	Coffee_C2	240,8	63,5	0,3	16,7	109,2	727,7	22,8	56,3
Chuvosa	Forest_C1_C2	981,6	176,2	0,2	934,7	317,8	2406,8	147,4	510,5
Chuvosa	Coffee_R1	388,2	105,3	0,3	25,1	228,5	1173,1	26,1	77,6
Chuvosa	Coffee_R2	354,0	104,1	0,3	23,8	185,0	938,1	20,2	199,2
Chuvosa	Forest_R1_R2	1009,3	208,3	0,2	728,9	144,9	2031,9	124,1	437,7
Chuvosa	Coffee_C3	282,1	86,4	0,3	88,9	181,2	1513,9	20,1	215,8
Chuvosa	Coffee_C4	268,9	131,3	0,5	157,9	414,2	1852,8	24,5	215,9
Chuvosa	Forest_C3_C4	893,6	167,7	0,2	669,4	291,7	3213,7	136,4	655,7
Chuvosa	Coffee_R3	492,7	143,4	0,3	236,6	402,6	2284,1	29,3	217,5
Chuvosa	Coffee_R4	286,4	101,5	0,4	204,1	380,3	2134,7	22,1	231,2
Chuvosa	Forest_R3_R4	1128,0	176,0	0,2	845,8	333,2	4034,0	164,3	691,9
Chuvosa	Coffee_C5	417,7	29,3	0,1	78,5	264,1	1328,0	18,2	76,3
Chuvosa	Coffee_C6	502,0	13,6	0,0	61,5	320,6	1415,0	15,4	95,2
Chuvosa	Forest_C5_C6	1118,1	66,8	0,1	582,5	177,1	1684,1	166,2	527,0
Chuvosa	Coffee_R5	648,2	66,4	0,1	183,1	296,7	1817,9	34,4	199,6
Chuvosa	Coffee_R6	619,5	52,9	0,1	166,0	265,8	1596,7	27,3	201,7
Chuvosa	Forest_R5_R6	1395,0	150,0	0,1	504,6	315,1	2750,9	175,6	597,6

As unidades do carbono da biomassa microbiana e das atividades enzimáticas estão apresentadas nas seguintes unidades: CBM, $\mu\text{g C g}^{-1}$ de solo; RESP, $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ de solo d^{-1} ; qCO₂, $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBM d}^{-1}$; Arilsulfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; β-glicosidase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Fosfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Urease, $\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; FDA, μg de fluoresceína g^{-1} de solo h^{-1} .

Tabela J K Diferença em % estimadas dos atributos microbiológicos do solo, sistema convencional, regenerativo e floresta, na estação seca e chuvosa.

Estação	Sistema	CBM	RESP	qCO ₂	β-glicosidase	Arilsulfaase	Urease	Fosfatase	FDA
Seca	C1 - F	-57,9	-1,1	84,2	15,8	-1,8	-77,4	-0,2	-4,4
Seca	C2 - F	-73,2	-1,9	142,5	-57,9	-2,0	-84,1	-0,6	-40,6
Seca	C3 - F	-71,1	-1,3	126,8	-3,7	-2,1	-80,6	-0,4	-52,3
Seca	C4 - F	-81,3	0,0	429,7	73,9	-1,8	-75,6	-0,4	-59,5
Seca	C5 - F	-64,4	-1,3	90,7	131,2	-2,7	-80,3	0,1	-51,7
Seca	C6 - F	-59,3	-4,3	-26,4	121,8	-2,9	-80,3	0,0	-54,8
Seca	R1 - F	-61,3	-1,2	66,4	144,3	-1,9	-81,2	-0,2	-30,7
Seca	R2 - F	-72,9	-1,4	160,9	56,4	-1,9	-83,9	-0,4	-14,3
Seca	R3 - F	-53,8	0,4	142,5	87,3	-1,3	-71,0	-0,2	-47,1
Seca	R4 - F	-85,3	-1,1	323,4	39,8	-1,4	-73,4	-0,3	-50,5
Seca	R5 - F	-55,3	-2,5	29,1	45,9	-2,4	-81,1	-0,2	-44,2
Seca	R6 - F	-62,8	-3,9	22,2	3,3	-2,6	-83,6	-0,5	-51,2
Chuvosa	C1 - F	-67,7	-2,4	40,6	-25,3	-2,5	-76,3	-0,6	-44,5
Chuvosa	C2 - F	-75,5	-3,0	38,7	-65,6	-2,8	-84,6	-0,9	-89,0
Chuvosa	C3 - F	-68,4	-2,2	73,1	-37,9	-2,5	-85,3	-0,6	-67,1
Chuvosa	C4 - F	-69,9	-0,9	203,0	42,0	-2,0	-82,0	-0,4	-67,1
Chuvosa	C5 - F	-62,6	-4,1	45,6	49,2	-2,6	-89,1	-0,3	-85,5
Chuvosa	C6 - F	-55,1	-6,7	-57,9	81,0	-2,8	-90,7	-0,2	-81,9
Chuvosa	R1 - F	-61,5	-2,0	27,0	57,6	-3,0	-79,0	-0,5	-82,3
Chuvosa	R2 - F	-64,9	-2,0	49,2	27,7	-3,0	-83,7	-0,7	-54,5
Chuvosa	R3 - F	-56,3	-0,7	85,1	20,8	-1,6	-82,1	-0,4	-68,6
Chuvosa	R4 - F	-74,6	-1,8	142,2	14,2	-1,7	-86,6	-0,4	-66,6
Chuvosa	R5 - F	-53,5	-2,7	-1,5	-5,9	-1,8	-80,4	-0,4	-66,6
Chuvosa	R6 - F	-55,6	-3,3	-30,1	-15,6	-1,9	-84,5	-0,5	-66,3

As unidades do carbono da biomassa microbiana e das atividades enzimáticas estão apresentadas nas seguintes unidades: CBM, $\mu\text{g C g}^{-1}$ de solo; RESP, $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ de solo d^{-1} ; qCO₂, $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$ CBM d^{-1} ; Arilsulfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; β-glicosidase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Fosfatase, $\mu\text{g NP g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; Urease, $\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}$ de solo h^{-1} ; FDA, μg de fluoresceína g^{-1} de solo h^{-1} .