

SUSTENTABILIDADE NA CAFEICULTURA CAPIXABA: SISTEMAS AGROFLORESTAIS COMO ALTERNATIVA PARA AUMENTO DA ATIVIDADE FOSFATASE DO SOLO

KAMILA DIAS DA SILVA¹, LETICIA BARBOZA CAPELLI², THATIANE SEVIDANES DA SILVA³, EDUARDO DE SÁ MENDONÇA⁴, LEANDRO FONSECA DE SOUZA⁵

¹ Graduanda em Agronomia, UFES, Alegre - ES, kamila.d.silva@edu.ufes.br;

² Mestranda em Ciências florestais, UFES, Jerônimo Monteiro – ES, leticiabcapelli@gmail.com

³ Graduada em Licenciatura em Ciências Biológicas, IFES, Alegre - ES, thatisevidanes@gmail.com

⁴ Prof. Titular, Departamento de Agronomia, CCAE, UFES, Alegre – ES. eduardo.mendonca@ufes.br

⁵ Prof. Assistente em Microbiologia, UFES, Alegre - ES, leandro.f.souza@ufes.br;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
06 a 09 de outubro de 2025

RESUMO: A cafeicultura tem grande representatividade na agricultura do Espírito Santo, demandando práticas mais sustentáveis para otimizar sua produção. Este trabalho busca avaliar Sistemas Agroflorestais como alternativa para preservar a qualidade biológica do solo, avaliada pela atividade enzimática da fosfatase ácida, fosfatase alcalina e arilsulfatase. O estudo foi realizado em diferentes tipos de manejo: (i) área sob cultivo convencional de café arábica há 10 anos; (ii) área com cultivo de café arábica em sistema agroflorestal (SAF), consorciado com palmito, banana, mandioca, jiló, feijão e espécies arbóreas nativas, há a cerca de 80 anos; e (iii) área de vegetação nativa preservada há mais de 20 anos. Os resultados demonstram algumas diferenças estatísticas entre cada sistema de manejo na análise química do solo, como o pH foi significativamente ácido, e o teor de alumínio trocável maior da área de vegetação nativa em comparação aos outros sistemas de manejo, e o SAF, apresentou uma maior soma de bases efetivas. Enquanto, algumas variáveis como, o fósforo disponível (P), a capacidade de troca catiônica (CTC), H⁺+Al e matéria orgânica (M.O.) não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos. Já nas análises das atividades enzimáticas, os resultados da atividade da fosfatase ácida demonstraram diferenças significativas entre o SAF e área de vegetação nativa em comparação ao sistema convencional.

PALAVRAS-CHAVE: SUSTENTABILIDADE; CAPARAÓ; MICROBIOLOGIA; BIOQUÍMICA DO SOLO.

SUSTAINABILITY IN COFFEE FARMING IN CAPIXABA: AGROFORESTRY SYSTEMS AS AN ALTERNATIVE FOR INCREASING SOIL PHOSPHATASE ACTIVITY

ABSTRACT: Coffee farming is a significant part of Espírito Santo's agriculture, requiring more sustainable practices to optimize its production. This study aims to evaluate agroforestry systems as an alternative for preserving soil biological quality, as assessed by the enzymatic activity of acid phosphatase, alkaline phosphatase, and arylsulfatase. The study was conducted in different management systems: (i) an area under conventional Arabica coffee cultivation for 10 years; (ii) an area under Arabica coffee cultivation in an agroforestry system (AFS), intercropped with hearts of palm, bananas, cassava, okra, beans, and native tree species, for approximately 80 years; and (iii) an area of native vegetation preserved for over 20 years. The results demonstrate some statistical differences between each management system in soil chemical analysis, such as significantly acidic pH and higher exchangeable aluminum content in the native vegetation area compared to the other management systems, and AFS

presented a higher sum of effective bases. Meanwhile, some variables such as available phosphorus (P), cation exchange capacity (CEC), $H^+ + Al$, and organic matter (OM) did not show statistically significant differences between treatments. In the analysis of enzymatic activities, the results of acid phosphatase activity showed significant differences between the AFS and native vegetation area compared to the conventional system.

KEYWORDS: SUSTAINABILITY; CAPARAÓ; MICROBIOLOGY; SOIL BIOCHEMISTRY.

INTRODUÇÃO

Sistemas Agroflorestais (SAF) são amplamente definidos como áreas de culturas agrícolas com cobertura florestal superior a 10%. Segundo (Zomer RJ, et al. 2016), no ano de 2010 este sistema representava 43% de todas as áreas agrícolas mundiais, e contribuiu para a qualidade bioquímica do solo abrigoando comunidades microbianas mais resilientes a estresses ambientais (WANG, J. et al., 2013).

Os organismos presentes no solo, como fungos e bactérias, secretam enzimas que funcionam como biocatalizadores que aceleram reações bioquímicas como a transformação de minerais e compostos orgânicos complexos em formas de nutrientes mais disponíveis (Peter K. Robinson, 2015). Estas atividades enzimáticas presentes no solo têm sido amplamente propostas como um indicador chave da qualidade do solo (Dick, 1997).

A disponibilidade de fósforo (P) é estimulada pelos materiais de origem do solo, resultado da ligação próxima entre os estoques reais nos solos e as propriedades físico-químicas (Augusto et al., 2017), e pode ser identificada por meio de análise da fosfatase ácida ou alcalina.

O enxofre (S), é um macronutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, e sua disponibilidade ao longo do desenvolvimento vegetal é necessária para obter colheitas com boa produtividade (ZENDA et al., 2021). A arilsulfatase é uma enzima extracelular produzida principalmente por microrganismos do solo, que liberam o íon sulfato, a forma mais disponível para as plantas (Kertesz & Mirleau, 2004).

Diante da importância da presença de P e S no solo e da sua disponibilidade para as plantas, este estudo busca utilizar dados provenientes de três formas de manejo do solo: cultivo convencional de café, SAF, e floresta nativa, para identificar qual sistema proporciona maior atividade das enzimas fosfatase ácida e alcalina, e da arilsulfatase.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solo foram coletadas em fevereiro de 2025, período marcado por temperaturas acima da média e ausência de precipitação. O estudo foi conduzido em três áreas distintas dentro do mesmo sítio, diferenciadas pelo tipo de manejo: (i) cultivo convencional de café arábica, mantido há mais de 10 anos; (ii) sistema agroflorestal (SAF), com café arábica consorciado a palmito, banana, mandioca, jiló, feijão e espécies arbóreas nativas, manejado por pelo menos 80 anos; e (iii) vegetação nativa preservada há mais de 20 anos. Esses sistemas permitem comparar os efeitos de diferentes práticas de manejo e da presença de vegetação nativa sobre a atividade enzimática e a fertilidade do solo.

Os solos das áreas estudadas foram classificados como Latossolo Vermelho distrófico (cultivo convencional e SAF) e Neossolo Quartzarênico (vegetação nativa), com textura predominantemente argilosa para o Latossolo e franco-arenosa para o Neossolo. Para cada sistema de manejo, foram coletadas cinco amostras distribuídas com 10 metros de distância entre si e a uma profundidade de 0–10 cm, garantindo representatividade da área e uniformidade nas análises.

O sítio está localizado no município de Alegre-ES, região do Caparaó, onde a produção agrícola é destinada tanto ao consumo familiar quanto à comercialização em feira agroecológica. As atividades enzimáticas foram avaliadas no Laboratório de Matéria Orgânica da UFES, campus de Alegre, utilizando protocolos adaptados de Tabatabai (1994). Os resultados, obtidos por leitura espectrofotométrica, foram expressos em $\mu\text{mol pNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ e submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey ($p < 0,05$) no software R, com dados representados em gráficos box-plot (Gráficos 1, 2 e 3) para facilitar a visualização das variações entre os sistemas.

Complementarmente, foram realizadas análises químicas do solo no Laboratório de Química do Solo da UFES, seguindo protocolos adaptados da Embrapa (1997), abrangendo parâmetros como pH, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC), fósforo disponível (P) e alumínio trocável, permitindo associar características químicas à atividade enzimática. Ressalta-se que fatores climáticos observados no período de coleta, como altas temperaturas e ausência de precipitação, podem ter modulados temporariamente a atividade microbiana e enzimática, constituindo uma limitação metodológica a ser considerada na interpretação dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos a partir das análises químicas apontaram diferenças significativas entre os diferentes sistemas de manejo (Tabela 1).

Tabela 1: Propriedades químicas do solo em cada tipo sistema de manejo

Sistemas de Manejo	pH (H ₂ O)	P (mg/dm ³)	Al (cmolc/dm ³)	H+Al (cmolc/dm ³)	CTC 7,0 (cmolc/dm ³)	t (cmolc/dm ³)	M.O (dag/Kg)
Área de vegetação nativa	4.4 ± 0.16 (b)	2.75 ± 0.07 (a)	1.8 ± 0.4 9 (a)	14.23 ± 3. 39 (a)	15.3 ± 3.3 4 (a)	2.87 ± 0.45 (a)	52.08 ± 3.6 6 (a)
Convencional	5.56 ± 0.2 5 (a)	5.9 ± 2.83 (a)	0.12 ± 0. 18 (b)	7.58 ± 0.0 6 (a)	11.01 ± 0. 83 (a)	3.54 ± 0.6 (a)	35.03 ± 5.4 (a)
SAF	6.0 ± 0.23 (a)	1.95 ± 0.49 (a)	0.0 ± 0.0 (b)	6.02 ± 1.0 (a)	11.58 ± 0. 95 (a)	5.56 ± 0.04 (b)	45.92 ± 13. 79 (a)

Valores expressos como média ± desvio padrão. As letras entre parênteses (a,b) indicam diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos para cada variável, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) após análise de variância (ANOVA). Tratamentos que compartilham a mesma letra não diferem significativamente entre si.

A análise química do solo (Tabela 1), apresentou as diferenças estatísticas entre cada sistema de manejo. Na área de vegetação nativa o pH foi significativamente mais ácido, comparado aos outros sistemas que não diferem entre si, podendo estar relacionado ao acúmulo de matéria orgânica em estágios mais avançados de decomposição. O teor de alumínio trocável também apresentou valores significativamente maiores na área de vegetação nativa, enquanto SAF e convencional apresentaram valores menores e estatisticamente iguais, podendo estar relacionada ao pH mais próximo da neutralidade, o que contribui para a mobilização do alumínio em formas não tóxicas para as plantas. Além disso, a soma de bases efetivas (t) foi significativamente maior no SAF, indicando uma maior disponibilidade de nutrientes básicos como Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ nesse sistema (SULLIVAN et al., 2022). Por outro lado, as variáveis fósforo disponível (P), capacidade de troca catiônica (CTC), H⁺+Al e matéria orgânica (M.O.) não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos.

Gráfico 1. Resultados da atividade da fosfatase ácida por tratamento

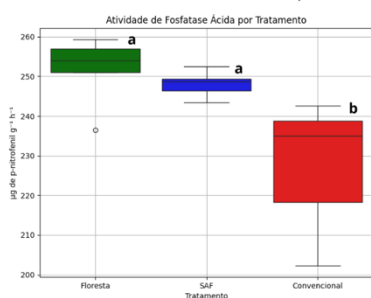


Gráfico 2. Resultados da atividade da fosfatase alcalina por tratamento

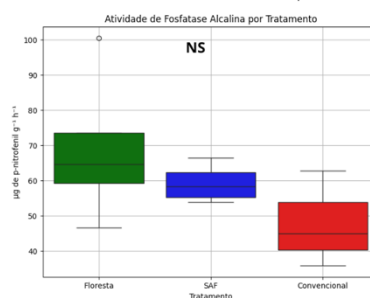
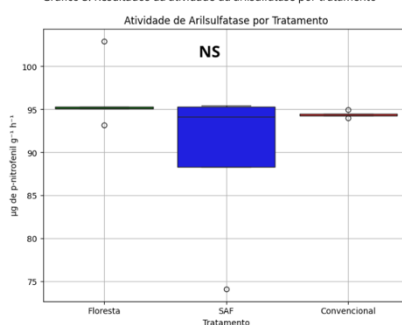


Gráfico 3. Resultados da atividade da arilsulfatase por tratamento



As letras entre parênteses a, b indicam diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos para cada variável, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) após análise de variância (ANOVA). Tratamentos que compartilham a mesma letra não diferem significativamente entre si. Já as letras NS indicam que não há diferenças significativas entre os tratamentos.

A análise da atividade da fosfatase ácida (Gráfico 1) evidencia que as áreas de floresta e SAF foram estatisticamente maiores em comparação ao sistema convencional ($p < 0,05$). Indicando que a presença de vegetação nativa ou sistemas biodiversos pode favorecer a atividade biológica do solo, especialmente na ciclagem do fósforo orgânico. Não houve diferença significativa entre floresta e SAF, o que demonstra que o sistema agroflorestal pode manter níveis de atividade da fosfatase ácida semelhantes aos da vegetação preservada. Para a fosfatase alcalina (Gráfico 2), não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os sistemas de manejo, embora a floresta tenha apresentado a maior média absoluta. A atividade da arilsulfatase (Gráfico 3), não variou significativamente entre os sistemas de manejo, podendo ser menos sensível às mudanças de manejo a curto e médio prazo, ou que pode ser mais sensível a outros fatores como textura, umidade, temperatura do solo e fatores sazonais (LOPES et al., 2021), que não foram monitorados nesse estudo. Por esse motivo, a arilsulfatase pode necessitar de análises a longo prazo, para que seja possível monitorar a ciclagem do enxofre e suas respectivas particularidades para melhor compreender sua dinâmica no solo.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos corroboram achados previamente descritos na literatura, indicando que a atividade da fosfatase ácida constitui um bioindicador sensível da qualidade do solo. Em contrapartida, a atividade da fosfatase alcalina, assim como a da arilsulfatase, não apresentou diferenças estatísticas significativas. Para uma avaliação mais robusta, recomenda-se o controle de variáveis climáticas e físicas do solo (como umidade, temperatura e textura), uma vez que tais fatores podem exercer influência direta sobre as atividades enzimáticas. Ademais, o monitoramento dessas enzimas em um período mais prolongado, considerando as variações sazonais, bem como a análise comparativa de áreas adjacentes, poderia fornecer uma compreensão mais abrangente dos processos envolvidos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e à Secretaria de Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca do Espírito Santo (SEAG/ES), pela concessão de

bolsa ao primeiro autor e pelo apoio financeiro indispensável ao desenvolvimento desta pesquisa, viabilizado no âmbito do projeto Inovagro 2024 – TO 1122.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTO, L.; ACHAT, D. L.; JONARD, M.; et al. Soil parent material: a major driver of plant nutrient limitations in terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, Hoboken, v. 23, p. 3808–3824, 2017.
- DICK, R. P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (eds.). *Biological Indicators of Soil Health*. Wallingford: CAB International, 1997. p. 121–156.
- KERTESZ, M. A.; MIRLEAU, P. The role of soil microbes in plant sulfur nutrition. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 55, n. 404, p. 1939–1945, 2004.
- LOPES, André Alves de Castro et al. Enzyme activities in a sandy soil of Western Bahia under cotton production systems: short-term effects, temporal variability, and the FERTBIO sample concept. *Brazilian Journal of Microbiology*, [S. l.], v. 52, p. 2193–2204, 2021.
- ROBINSON, P. K. *Enzymes: principles and biotechnological applications*. Essays in Biochemistry, London, v. 59, p. 1–41, 2015.
- SULLIVAN, Wayne F. et al. *Cation Exchange Capacity and Base Saturation*. Cooperative Extension Circular 1040. Athens: University of Georgia Cooperative Extension Service; Fort Valley State University; U.S. Department of Agriculture; County Governments of Georgia, 2022.
- WANG, J.; YANG, L.; ZHANG, J.; CHEN, W.; WU, S. Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 370, n. 1–2, p. 479–494, 2013.
- ZENDA, Tinashe; LIU, Songtao; DONG, Anyi; DUAN, Huijun. Revisiting sulphur—The once neglected nutrient: It's roles in plant growth, metabolism, stress tolerance and crop production. *Agronomy*, Basel, v. 11, n. 4, p. 1–27, 2021.
- ZOMER, R. J.; NEUFELDT, H.; XU, J.; AHREND, A.; BOSSIO, D.; TRABUCCO, A.; VAN NOORDWIJK, M.; WANG, M. Global tree cover and biomass carbon on agricultural land: the contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Environmental Research Letters*, Bristol, v. 11, n. 12, p. 125005, 2016.