

**ATIVIDADE MICROBIANA E CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS  
NA AMAZÔNIA ORIENTAL: ESTUDO DE CASO EM MARABÁ, PARÁ**

**MICROBIAL ACTIVITY AND SOIL CARBON IN AGROFORESTRY SYSTEMS IN THE  
EASTERN AMAZON: CASE STUDY IN MARABÁ, PARÁ**

**ACTIVIDAD MICROBIANA Y CARBONO DEL SUELO EN SISTEMAS  
AGROFORESTALES EN LA AMAZONÍA ORIENTAL: ESTUDIO DE CASO EN MARABÁ,  
PARÁ**



10.56238/revgeov16n5-219

**Gleudson Marques Pereira**

Doutor em Ciências Ambientais

Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)

E-mail: gleudson.pereira@uepa.br

**Marcos Deoytsu Lima Kaiano**

Graduando em Engenharia Agrônômica

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

E-mail: mdlk1313@gmail.com

**Paula Danielle Lima da Silva**

Especialista em Direito Processual Civil

Instituição: Universidade Estácio de Sá

E-mail: paulaelle@gmail.com

**Marcos Pedro de Paiva Elias**

Doutorando em Educação

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

E-mail: exemplo@ufpr.br

**Nazareno Melo da Silva**

Mestre em Recursos Hídricos

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

E-mail: nazareno.melo@ifpa.edu.br

**Orlando Sauma Lameira**

Especialista em Georreferenciamento de imóveis rurais

Instituição: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Pará

E-mail: orlandoslameira@hotmail.com



**Shirley Cristina Martins da Silva**

Mestre em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia  
Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)  
E-mail: shirleycmsilvaa@gmail.com

**Luiz Fernandes Silva Dionisio**

Doutor em Ciências Florestais  
Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)  
E-mail: luiz.fs.dionisio@uepa.br

**RESUMO**

O solo constitui um recurso essencial para a manutenção dos ecossistemas e o equilíbrio ambiental. A atividade microbiana desempenha papel determinante na ciclagem de nutrientes, na estabilidade estrutural e na fertilidade do solo, sendo, portanto, um indicador sensível da qualidade ambiental. Este estudo teve como objetivo avaliar a atividade da comunidade microbiana e o teor de carbono da biomassa microbiana do solo em sistemas agroflorestais (SAF), mata nativa e monocultura de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) em uma propriedade rural localizada na região de Marabá, sudeste do Pará, Amazônia Oriental. As análises foram realizadas com base nos parâmetros de Respiração Basal do Solo (RBS) e Carbono da Biomassa Microbiana (CBM), aplicando o método de fumigação-incubação. Os resultados demonstraram que o sistema agroflorestal apresentou desempenho semelhante ao da mata nativa, indicando elevado potencial de recuperação de áreas degradadas e estabilidade ecológica, enquanto o sistema de monocultura revelou menores níveis de atividade microbiana e fertilidade. Esses achados reforçam a relevância dos SAFs como estratégias de manejo sustentável e mitigação dos impactos das mudanças climáticas na Amazônia.

**Palavras-chave:** Qualidade do Solo. Sistemas Agroflorestais. Carbono Microbiano. Sustentabilidade. Amazônia Oriental.

**ABSTRACT**

Soil is an essential resource for maintaining ecosystems and environmental balance. Microbial activity plays a decisive role in nutrient cycling, structural stability, and soil fertility, and is therefore a sensitive indicator of environmental quality. This study aimed to evaluate microbial community activity and microbial biomass carbon content in soil in agroforestry systems (AFS), native forest, and cassava (*Manihot esculenta* Crantz) monoculture on a rural property located in the Marabá region, southeastern Pará, Eastern Amazon. The analyses were performed based on the parameters of Soil Basal Respiration (SBR) and Microbial Biomass Carbon (MBC), applying the fumigation-incubation method. The results showed that the agroforestry system performed similarly to native forest, indicating high potential for the recovery of degraded areas and ecological stability, while the monoculture system revealed lower levels of microbial activity and fertility. These findings reinforce the relevance of SAFs as strategies for sustainable management and mitigation of the impacts of climate change in the Amazon.

**Keywords:** Soil Quality. Agroforestry Systems. Microbial Carbon. Sustainability. Eastern Amazon.

**RESUMEN**

El suelo es un recurso esencial para el mantenimiento de los ecosistemas y el equilibrio medioambiental. La actividad microbiana desempeña un papel determinante en el ciclo de los



nutrientes, la estabilidad estructural y la fertilidad del suelo, por lo que es un indicador sensible de la calidad medioambiental. El objetivo de este estudio fue evaluar la actividad de la comunidad microbiana y el contenido de carbono de la biomasa microbiana del suelo en sistemas agroforestales (SAF), bosque nativo y monocultivo de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) en una propiedad rural ubicada en la región de Marabá, sureste de Pará, Amazonia Oriental. Los análisis se realizaron basándose en los parámetros de respiración basal del suelo (RBS) y carbono de la biomasa microbiana (CBM), aplicando el método de fumigación-incubación. Los resultados demostraron que el sistema agroforestal presentó un rendimiento similar al del bosque nativo, lo que indica un alto potencial de recuperación de áreas degradadas y estabilidad ecológica, mientras que el sistema de monocultivo reveló menores niveles de actividad microbiana y fertilidad. Estos hallazgos refuerzan la relevancia de los SAF como estrategias de manejo sostenible y mitigación de los impactos del cambio climático en la Amazonía.

**Palabras clave:** Calidad del Suelo. Sistemas Agroforestales. Carbono Microbiano. Sostenibilidad. Amazonia Oriental.



## 1 INTRODUÇÃO

O solo é um componente fundamental dos ecossistemas terrestres, desempenhando papel essencial na sustentação da vida, na ciclagem de nutrientes e no equilíbrio climático global. No entanto, as pressões antrópicas decorrentes da expansão agropecuária e do uso inadequado da terra têm provocado degradação crescente dos solos tropicais, especialmente na região amazônica, onde os ecossistemas são altamente sensíveis às alterações antrópicas (Melo et al., 2021). A intensificação de monoculturas e o manejo inadequado contribuem para a perda de matéria orgânica, compactação, erosão e declínio da fertilidade, afetando a biodiversidade microbiana e, conseqüentemente, a funcionalidade ecológica do solo (Sousa et al., 2023).

A atividade microbiana do solo constitui um indicador sensível da qualidade ambiental, pois reflete o equilíbrio entre os processos de decomposição, mineralização e estocagem de carbono (Teixeira et al., 2021). A comunidade microbiana atua na ciclagem de nutrientes, na decomposição da matéria orgânica e na fixação de carbono, sendo essencial para a manutenção da estrutura e da fertilidade dos solos tropicais (Gomes et al., 2024). Dessa forma, o estudo da biomassa microbiana e da respiração basal do solo permite compreender como diferentes sistemas de uso e manejo interferem na sustentabilidade agroecológica e na capacidade de sequestro de carbono (Mendonça et al., 2020).

No contexto amazônico, os Sistemas Agroflorestais (SAFs) têm se destacado como alternativas promissoras à agricultura convencional, integrando espécies arbóreas, frutíferas e cultivos agrícolas em arranjos que simulam a estrutura e o funcionamento de ecossistemas naturais (Lima et al., 2021). Esses sistemas favorecem a deposição de serapilheira, aumentam o teor de matéria orgânica e proporcionam microclimas mais estáveis, que estimulam a diversidade e a atividade microbiana (Costa et al., 2022). Além disso, os SAFs contribuem para o sequestro de carbono e a mitigação das mudanças climáticas, consolidando-se como instrumentos estratégicos para a conservação dos recursos naturais na Amazônia (Barbosa et al., 2023).

Por outro lado, a monocultura, ainda predominante em muitas áreas rurais da Amazônia, caracteriza-se por baixa diversidade biológica e maior vulnerabilidade à degradação, exigindo altos insumos externos e reduzindo a resiliência do solo (Farias et al., 2021). A comparação entre sistemas agroflorestais, matas nativas e monoculturas é, portanto, fundamental para avaliar os impactos do manejo sobre a qualidade do solo, especialmente no que se refere ao carbono da biomassa microbiana — indicador direto da saúde e da funcionalidade ecológica dos ecossistemas edáficos (Moura et al., 2020; Dissanayaka et al., 2024).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a atividade microbiana e o carbono da biomassa microbiana do solo em diferentes sistemas de uso da terra — agroflorestal, mata nativa e monocultura de mandioca — em uma propriedade rural situada no município de Marabá, Pará, localizada na Amazônia Oriental. Busca-se compreender como esses sistemas influenciam a dinâmica



do carbono no solo, destacando o papel dos SAFs como estratégias sustentáveis de manejo e conservação dos solos amazônicos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A microbiota do solo exerce papel fundamental na manutenção dos processos ecológicos, influenciando diretamente a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e o equilíbrio entre os compartimentos de carbono e nitrogênio. Essa comunidade microbiana é considerada um bioindicador sensível da qualidade do solo, refletindo as alterações ambientais decorrentes do uso e manejo da terra (Quintero et al., 2022). A diversidade e a atividade microbiana sustentam funções essenciais, como a mineralização de compostos orgânicos e a formação de agregados estáveis, o que contribui para a resiliência e fertilidade dos ecossistemas edáficos (Carrasco-Espinosa et al., 2022).

O carbono da biomassa microbiana (CBM) representa a fração viva da matéria orgânica do solo e é amplamente reconhecido como um indicador dinâmico de qualidade ambiental (Padbushan et al., 2021). O CBM participa ativamente na fixação, transformação e liberação de nutrientes, além de atuar como reservatório temporário de carbono, influenciando o balanço global desse elemento. Estudos recentes destacam que solos manejados sob sistemas sustentáveis, como os sistemas agroflorestais (SAFs), tendem a apresentar maiores teores de carbono microbiano e eficiência metabólica quando comparados a áreas de monocultura (Matos et al., 2023; Gomes et al., 2024).

Nos ecossistemas tropicais, a sensibilidade do CBM às mudanças no uso da terra torna-o ferramenta importante para avaliar os impactos da intensificação agrícola e as estratégias de mitigação de degradação (Costa et al., 2022). Além disso, o equilíbrio entre a respiração basal do solo (RBS) e o CBM — expresso pelo quociente metabólico ( $qCO_2$ ) — fornece informações sobre a eficiência energética e o estresse fisiológico da comunidade microbiana, sendo amplamente aplicado em diagnósticos de sustentabilidade (Moura et al., 2020; Barbosa et al., 2023).

Os sistemas agroflorestais têm se consolidado como alternativas viáveis para conciliar produção agrícola e conservação ambiental na Amazônia. Ao integrar espécies lenhosas e cultivos agrícolas, esses sistemas favorecem o aporte contínuo de resíduos orgânicos e a proteção da superfície do solo, criando microclimas estáveis e ambientes propícios à atividade microbiana (Lima et al., 2021; Dissanayaka et al., 2024). A diversidade vegetal nos SAFs também influencia positivamente a estrutura da comunidade microbiana, promovendo interações simbióticas e sinérgicas que aumentam a capacidade de sequestro de carbono e de recuperação da fertilidade (Teixeira et al., 2021).

Por outro lado, o manejo convencional, baseado em monoculturas e uso intensivo do solo, promove redução drástica da biomassa microbiana e perda de carbono orgânico, comprometendo os serviços ecossistêmicos e a sustentabilidade agrícola (Farias et al., 2021). A substituição da vegetação nativa por sistemas simplificados acarreta ruptura no ciclo biogeoquímico, com consequente redução



da capacidade de autorregulação do ecossistema (Melo et al., 2021). Assim, compreender a dinâmica microbiana em diferentes sistemas de uso da terra é essencial para embasar políticas de manejo sustentável e estratégias de mitigação das mudanças climáticas na Amazônia Oriental (Barbosa et al., 2023; Gomes et al., 2024).

Em síntese, o referencial teórico evidencia que a atividade microbiana e o carbono da biomassa microbiana constituem indicadores robustos para avaliar a qualidade do solo e os efeitos do manejo agroecológico. Os SAFs demonstram potencial de reabilitar funções ecológicas e restaurar a fertilidade dos solos amazônicos, configurando-se como ferramenta estratégica para o desenvolvimento sustentável da região.

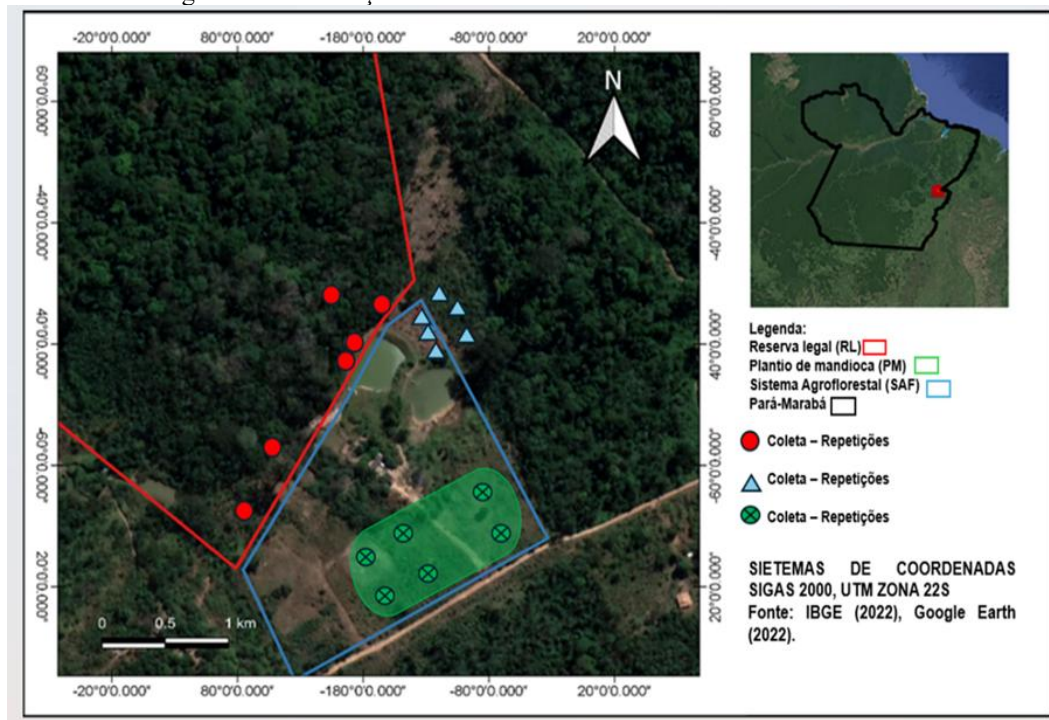
### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 ÁREA DE ESTUDO**

O Projeto Desenvolvimento Sustentável (PDS) Porto Seguro, área de estudo (Figura 1), está localizado na rodovia BR-155, Km 14, na Zona Rural do município de Marabá, Pará. A área total do PDS é de 1.069 hectares, a qual comporta 37 lotes, com longitude de 049° 02.041 (W) e latitude de 05° 28.134 (S) de Greenwich, altitude média de 85m, com clima tropical, classificado de clima Aw segundo a Köppen e Geiger (DA SILVA et al., 2023). A região apresenta clima tropical úmido do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen-Geiger, com estação chuvosa concentrada entre dezembro e maio, precipitação média anual de 1.837 mm e temperatura média de 27 °C (INMET, 2024). O relevo local é suavemente ondulado, caracterizado por solos de textura média a argilosa, predominando Argissolos Amarelos típicos da região de transição entre floresta ombrófila densa e áreas de uso agropecuário. A vegetação original corresponde à Floresta Amazônica secundária, com alta diversidade florística.



Figura 1 - Localização da área de estudo e seus diferentes tratamentos.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

### 3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

Foram coletadas amostras em três áreas distintas de uso da terra dentro da mesma propriedade (Figura 1). No dia 11 de fevereiro de 2024, foi aplicado o delineamento experimental inteiramente casualizado, com três tratamentos e seis repetições, totalizando dezoito amostras compostas a uma profundidade de 0 – 10 cm.

T1 – Sistema Agroflorestal (SAF): composto por espécies frutíferas e arbóreas nativas (mangueira, cupuaçuzeiro, cacau, açaizeiro e ingazeiro), implantado há aproximadamente cinco anos.

T2 – Reserva Legal (RL): área conservada de vegetação nativa, representando o ecossistema de referência de acordo com a Lei 12.651/2012.

T3 – Monocultura de mandioca (MM): cultivo anual de *Manihot esculenta* Crantz, estabelecido há cerca de um ano.

### 3.3 AMOSTRAGEM DE SOLO

Em cada sistema, foram coletadas amostras compostas de solo na profundidade de 0 – 10 cm, utilizando trado holandês. As amostras foram obtidas a partir de cinco subamostras aleatórias por área, homogêneas e acondicionadas em sacos plásticos esterilizados, mantidas sob refrigeração até o processamento laboratorial.

As amostras foram peneiradas (malha de 2 mm) para remoção de raízes e fragmentos grosseiros e posteriormente incubadas por sete dias em ambiente escuro e controlado ( $25 \pm 2$  °C) para estabilização da atividade microbiana.



### 3.4 DETERMINAÇÃO DA RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO (RBS)

A Respiração Basal do Solo (RBS) foi determinada de acordo com o método adaptado de Jenkinson e Powlson (1976), utilizando-se o sistema de fumigação e incubação. Para cada tratamento, foram utilizadas amostras fumigadas (F) e não fumigadas (NF). O CO<sub>2</sub> liberado durante o processo foi capturado em solução de hidróxido de sódio (NaOH 0,5 M) e posteriormente titulado com ácido clorídrico (HCl 0,5 M).

O cálculo da RBS seguiu a seguinte expressão (1):

$$RBS = \frac{((Vb - Va) \times M \times 6)}{Ps \times T} \quad (1)$$

onde:

Vb = volume de HCl gasto no branco (mL);

Va = volume de HCl gasto na amostra (mL);

M = molaridade exata do HCl;

Ps = peso seco do solo (g);

T = tempo de incubação (h).

### 3.5 DETERMINAÇÃO DO CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA (CBM)

O Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) foi estimado pela diferença entre as taxas de respiração basal das amostras fumigadas e não fumigadas (2), utilizando o fator de correção  $Kc = 0,41$  (Anderson & Domsch, 1993):

$$CBM = \frac{(RBS_F - RBS_{NF})}{Kc} \quad (2)$$

onde:

$RBS_F$  = Respiração Basal do Solo Fumigado;

$RBS_{NF}$  = Respiração Basal do Solo Não Fumigado;

$Kc = 0,41$

O quociente metabólico ( $qCO_2$ ) foi calculado pela razão entre a RBS e o CBM, sendo utilizado como indicador da eficiência metabólica dos microrganismos do solo.

### 3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados das análises químicas do solo foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-



Wilk ( $p > 0,05$ ). Atendidos a esse pressuposto foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e em caso de diferença significativa ( $p < 0,05$ ) as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. As análises estatísticas e elaboração dos gráficos foram feitas utilizando o programa estatístico Minitab versão 15 (CHARLES-PIERRE, 2020). A elaboração de gráficos e tabelas foi conduzida no Microsoft Excel 365 e confirmada com o auxílio do RStudio v.4.3 para validação dos dados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DA NORMALIDADE E VARIAÇÃO DOS DADOS

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk indicou que os dados de Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) apresentaram distribuição normal ( $p > 0,05$ ) em todos os tratamentos analisados, permitindo o uso de testes paramétricos subsequentes. Essa homogeneidade dos dados demonstra a consistência do método aplicado e a baixa variação intragrupo, conforme também relatado por Dissanayaka et al. (2024) em estudos semelhantes conduzidos em solos tropicais sob sistemas agroflorestais.

A análise de variância (ANOVA) revelou diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos, indicando que os distintos sistemas de uso da terra influenciaram de forma direta a atividade microbiana do solo. O resultado confirma que a estrutura e a diversidade vegetal dos sistemas exercem papel determinante sobre a microbiota e os processos biogeoquímicos, corroborando achados recentes de Costa et al. (2022) e Barbosa et al. (2023).

### 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE USO DA TERRA

Os valores médios de CBM demonstraram que o Sistema Agroflorestal (T1) e a Reserva Legal (T2) apresentaram os maiores teores de carbono microbiano, diferindo estatisticamente da Monocultura de mandioca (T3) (Tukey,  $p < 0,05$ ). Esse comportamento reforça o papel dos SAFs como sistemas intermediários de transição ecológica, capazes de reproduzir parcialmente a dinâmica da floresta nativa em termos de aporte de matéria orgânica e ciclagem de carbono (Lima et al., 2021).

O acúmulo de carbono microbiano nos sistemas T1 e T2 está associado à maior disponibilidade de resíduos vegetais, cobertura do solo e menor amplitude térmica, condições que favorecem o crescimento de comunidades microbianas estáveis (Gomes et al., 2024). A presença de espécies arbóreas e frutíferas no SAF contribui para o aumento da serapilheira, do teor de carbono orgânico total e da complexidade do habitat microbiano — fatores determinantes para a fertilidade e resiliência dos solos amazônicos (Teixeira et al., 2021; Sousa et al., 2023).

Em contraste, o sistema de monocultura (T3) apresentou os menores valores de CBM e respiração basal, evidenciando baixa atividade biológica. A ausência de diversidade vegetal e a

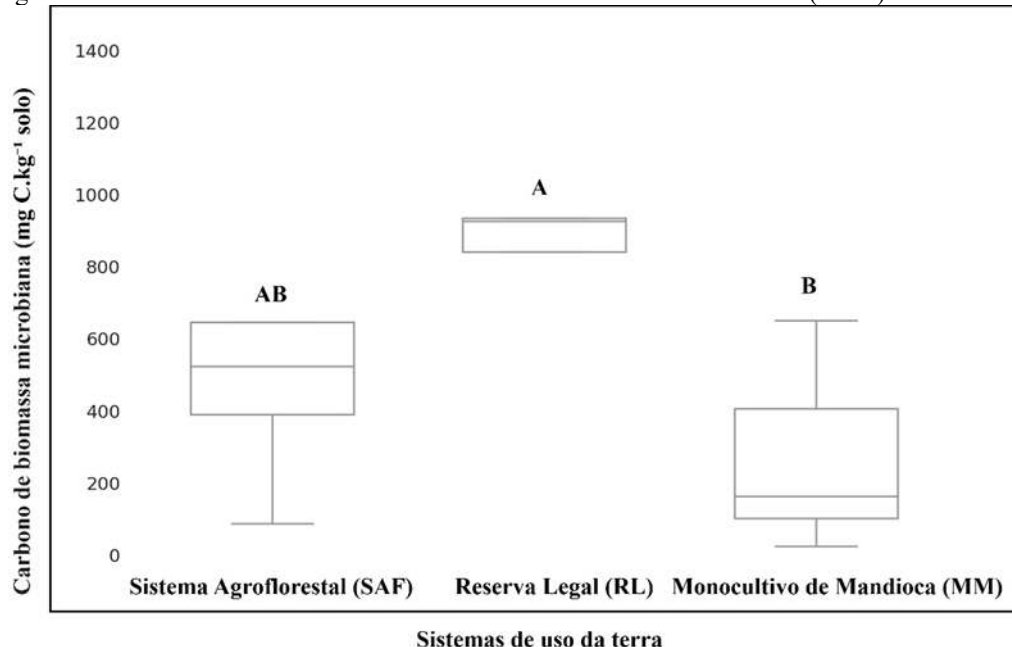


exposição direta do solo à radiação solar favorecem a mineralização acelerada da matéria orgânica e a redução da biomassa microbiana (Farias et al., 2021). Além disso, a declividade do terreno e o uso limitado de práticas conservacionistas intensificam o processo de erosão e lixiviação, reduzindo o aporte de carbono e nutrientes (Mendonça et al., 2020).

### 4.3 INTERPRETAÇÃO ECOLÓGICA DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos indicam que os SAFs representam um modelo eficaz de manejo sustentável, com potencial para restaurar as funções ecológicas dos solos degradados (Figura 2). A maior eficiência metabólica (menor  $qCO_2$ ) observada no SAF e na Mata Nativa reflete um ambiente de equilíbrio energético, em que a microbiota utiliza o carbono disponível de forma mais eficiente, reduzindo perdas por respiração (Barbosa et al., 2023).

Figura 2 - Tratamentos com as médias de Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) com teste Tukey.



\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.  
Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Esses resultados estão alinhados com pesquisas recentes realizadas na Amazônia Oriental, que destacam os SAFs como sistemas de uso da terra capazes de combinar produção agrícola, sequestro de carbono e estabilidade ecológica (Costa et al., 2022; Melo et al., 2021). O incremento do carbono microbiano nesses sistemas sugere a formação de estoques estáveis de matéria orgânica, essenciais para a mitigação das mudanças climáticas e o aumento da resiliência dos solos amazônicos (Dissanayaka et al., 2024).

No caso da monocultura de mandioca, os baixos valores de CBM indicam condições de estresse para os microrganismos do solo, possivelmente em função da menor complexidade radicular e da escassez de substrato orgânico. Situação semelhante foi observada por Sousa et al. (2023), que



relataram declínio de até 60% na biomassa microbiana em áreas de cultivo intensivo de mandioca na Amazônia Oriental. Esses resultados reforçam a necessidade de incorporar práticas agroecológicas, como adubação verde e consórcios de espécies, visando restabelecer o equilíbrio biológico do solo (Gomes et al., 2024).

Em síntese, a atividade microbiana e o carbono da biomassa microbiana mostraram-se sensíveis aos diferentes usos da terra, configurando-se como indicadores eficientes da qualidade do solo. A equivalência observada entre o SAF e a Mata Nativa destaca o potencial desses sistemas como ferramentas estratégicas de recuperação ambiental e de promoção da sustentabilidade agrícola na Amazônia.

## 5 CONCLUSÃO

A análise do carbono da biomassa microbiana evidenciou que os diferentes sistemas de uso da terra influenciam de forma significativa a atividade biológica e a dinâmica do carbono no solo. O sistema agroflorestal apresentou comportamento semelhante ao da mata nativa, demonstrando maior estabilidade ecológica, eficiência metabólica e capacidade de regeneração da qualidade edáfica. Esses resultados comprovam que os SAFs favorecem o aumento da biomassa microbiana e o acúmulo de carbono orgânico, constituindo-se como alternativa viável e sustentável para a recuperação de áreas degradadas na Amazônia Oriental.

Em contrapartida, o sistema de monocultura de mandioca apresentou os menores níveis de carbono microbiano e respiração basal, refletindo menor equilíbrio biológico e perda da fertilidade natural do solo. A adoção de práticas agroecológicas, como os sistemas integrados e a diversificação de cultivos, é essencial para mitigar a degradação, promover o sequestro de carbono e fortalecer a resiliência dos ecossistemas amazônicos frente às pressões climáticas e antrópicas. Assim, o manejo sustentável do solo desponta como estratégia indispensável para a conservação da biodiversidade e para a manutenção da produtividade agrícola na região.



## REFERÊNCIAS

- Anderson, T. H., & Domsch, K. H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions on microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(3), 393–395, 1993. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)
- Barbosa, R. F., Costa, L. S., & Almeida, A. P. Agroforestry systems and carbon sequestration in tropical soils: a synthesis for the Amazon region. *Journal of Environmental Management*, 347, 118-129, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119200>
- Carrasco-Espinosa, K., Avitia, M., Barrón-Sandoval, A., Abbruzzini, T. F., Salazar Cabrera, U.I., Arroyo-Lambaer, D., ... & Escalante, A. E. Mudanças no uso da terra e intensificação do manejo estão associadas a alterações na composição das comunidades microbianas do solo e sua diversidade funcional em agroecossistemas de café. *Microorganisms*, 10 (9), 1763, 2022. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091763>
- Charles-Pierre, M. Guia rápido Minitab: estatística univariada e multivariada, volume 2 / Maxime CharlesPierre. – 1. ed. – Rio de Janeiro: PoD, 2020.
- Costa, J. R., Silva, D. M., & Nascimento, H. S. Microbial biomass and soil quality under agroforestry systems in eastern Amazonia. *Agroforestry Systems*, 96(4), 811–824, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00802-7>
- Dissanayaka, D. M. N. S., Udumann, S. S., & Atapattu, A. J. Synergies between tree crops and ecosystems in tropical agroforestry. *Agroforestry*, 49-87, 2024. <https://doi.org/10.1002/9781394231164.ch3>
- Jenkinson, D. S., & Powelson, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—I. Fumigation with chloroform. *Soil Biology and Biochemistry*, 8(3), 167–177, 1976.
- Farias, M. C., Pereira, L. A., & Rocha, F. R. Soil degradation and carbon loss in cassava monoculture systems in the Amazon. *Environmental Research Letters*, 16(9), 094010, 2021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1f7b>
- Gomes, V. C., Andrade, R. J., & Oliveira, P. N. Microbial activity as an indicator of soil resilience in tropical agroecosystems. *Soil Biology & Biochemistry*, 192, 109099, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109099>
- INMET. Boletim climatológico anual do Pará: dados de Marabá. Instituto Nacional de Meteorologia, 2024. <https://portal.inmet.gov.br>
- Lima, A. R., Ferreira, C. M., & Souza, B. L. Agroforestry systems as ecological restoration tools in degraded areas of the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 496, 119432, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119432>
- Matos, P. S., Pinto, L. A. D. S. R., Lima, S. S. D., Alves, T. D. C., Cerri, E. P., Pereira, M. G., & Zonta, E. Frações de carbono orgânico do solo em sistema agroflorestal no Brasil: sazonalidade e avaliação dinâmica de curto prazo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47 (spe), e0220095, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20220095>
- Melo, V. F., Barros, L. S., Silva, M. C., Veloso, T. G., Senwo, Z. N., Matos, K. S., & Nunes, T. K. Diversidade bacteriana do solo e resposta ao desmatamento, uso da terra e queimadas no norte da Amazônia, Brasil. *Ecologia Aplicada do Solo*, 158, 103775, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103775>



Mendonça, S. S., Carvalho, R. J., & Nogueira, A. M. Carbon dynamics and microbial biomass in soils under different land uses in the Amazon Basin. *Catena*, 187, 104-156, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104156>

Moura, T. A., Santos, J. M., & Silva, A. D. Microbial biomass carbon as a soil quality indicator in tropical agroecosystems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44, e0200031, 2020.  
<https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200031>

Padbhushan, R., Sharma, S., Kumar, U., Rana, D. S., Kohli, A., Kaviraj, M., & Gupta, V. V. Abordagem de meta-análise para medir o efeito do manejo integrado de nutrientes no desempenho das culturas, atividade microbiana e estoques de carbono em solos indianos. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 724702, 2021. doi: 10.3389/fenvs.2021.724702

Quintero, I., Daza-Cruz, Y. X., & León-Sicard, T. Estrutura agroecológica principal: um índice para avaliar a agrobiodiversidade em agroecossistemas. *Sustentabilidade*, 14 (21), 13738, 2022.  
<https://doi.org/10.3390/su142113738>

R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R. A Language and Environment for Statistical Computing*. Viena, Áustria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

Sousa, A. R., Barros, C. P., & Lima, F. J. Impacts of agricultural intensification on soil microbial diversity in the eastern Amazon. *Applied Soil Ecology*, 191, 104906, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104906>

Teixeira, P. L., Cunha, F. A., & Moreira, C. A. Microbial indicators of soil quality under tropical land-use systems. *Ecological Indicators*, 130, 108096, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108096>

