

QUALIDADE QUÍMICA DO SOLO E SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS DE AGRICULTURA FAMILIAR NA AMAZÔNIA ORIENTAL: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA

Gleidson Marques Pereira¹, Naciele do Carmo Moreira Lisboa², Anderson Madson Oliveira Maia³, Iêdo Souza Santos⁴, Seidel Ferreira dos Santos⁵, Naelma do Carmo Moreira Lisboa⁶

¹Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Brasil (gleidson.pereira@uepa.br)

² Universidade do Estado do Pará (UEPA), Castanhal, Brasil.

³ Universidade do Estado do Pará (UEPA), Castanhal, Brasil.

⁴Universidade do Estado do Pará (UEPA), Castanhal, Brasil.

⁵Universidade do Estado do Pará (UEPA), Castanhal, Brasil.

⁶Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Belém, Brasil.

Resumo: A qualidade química do solo constitui um dos principais indicadores da sustentabilidade de agroecossistemas tropicais, especialmente em regiões sob intensa pressão antrópica, como a Amazônia Oriental. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os atributos químicos do solo em diferentes sistemas de uso da terra no Projeto de Desenvolvimento Sustentável Porto Seguro, município de Marabá, Pará. Foram avaliados três sistemas produtivos: Sistema Agroflorestal (SAF), cultivo de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) e cultivo de banana (*Musa spp.*). As amostras de solo foram submetidas a análises químicas para determinação dos atributos de fertilidade, incluindo matéria orgânica, pH, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, capacidade de troca catiônica e saturação por bases. Os dados foram analisados por estatística descritiva, análise de variância (ANOVA), teste de Tukey ($p < 0,05$), Análise de Componentes Principais (PCA) e Heatmap com padronização por Z-score. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre os sistemas avaliados, destacando-se o SAF pelos maiores teores de matéria orgânica e melhor desempenho nos indicadores relacionados à fertilidade do solo. A PCA explicou 84,0% da variabilidade total dos dados nos dois primeiros componentes principais, demonstrando elevada capacidade de discriminação entre os sistemas produtivos. Os atributos matéria orgânica, cálcio, capacidade de troca catiônica e saturação por bases foram os principais responsáveis pela diferenciação dos ambientes avaliados. O Heatmap confirmou a superioridade do SAF, evidenciando maior associação com atributos químicos favoráveis e melhor equilíbrio funcional da fertilidade do solo. Os cultivos de mandioca e banana apresentaram menores níveis de matéria orgânica e menor associação com os indicadores de qualidade edáfica, refletindo sistemas menos eficientes na conservação dos nutrientes. Conclui-se que os sistemas agroflorestais constituem uma estratégia promissora para a manutenção da qualidade química do solo, contribuindo para a sustentabilidade produtiva, o aumento dos estoques de carbono e a conservação dos recursos naturais em agroecossistemas familiares da Amazônia.

Palavras-chave: Agroecossistemas; Fertilidade do solo; Sistemas agroflorestais; Agricultura familiar; Amazônia Oriental.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por alimentos, associada às pressões decorrentes das mudanças climáticas e da expansão agrícola, tem intensificado a necessidade de sistemas produtivos capazes de conciliar produtividade, conservação ambiental e manutenção da qualidade do solo. Nesse contexto, os solos tropicais amazônicos assumem papel estratégico para

a segurança alimentar, a conservação da biodiversidade e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, especialmente em áreas ocupadas por agricultores familiares (Mukherji et al., 2024).

A qualidade do solo é reconhecida como um dos principais indicadores da sustentabilidade dos agroecossistemas, uma vez que integra atributos físicos, químicos e biológicos responsáveis pela

manutenção das funções ecossistêmicas. Entre esses atributos, as propriedades químicas exercem influência direta sobre a disponibilidade de nutrientes, a dinâmica da matéria orgânica, a atividade microbiana e a produtividade agrícola (Bünemann et al., 2023). Em ambientes amazônicos, caracterizados predominantemente por solos altamente intemperizados e naturalmente ácidos, pequenas alterações nos sistemas de manejo podem promover mudanças significativas na fertilidade e na capacidade produtiva do solo.

Nas últimas décadas, os sistemas agroflorestais (SAFs) têm sido amplamente reconhecidos como uma das principais estratégias para a recuperação de áreas degradadas e para a promoção da sustentabilidade agrícola na Amazônia (Jinger et al., 2023). Esses sistemas favorecem maior aporte de resíduos orgânicos, incremento do estoque de carbono, melhoria da ciclagem de nutrientes e redução das perdas por erosão, contribuindo para a manutenção da qualidade química do solo quando comparados aos sistemas convencionais de monocultivo (Eddy & Yang, 2022; Singh et al., 2024). Além disso, os SAFs promovem maior resiliência frente aos eventos climáticos extremos, tornando-se alternativa estratégica para a agricultura familiar amazônica.

A elevada complexidade dos processos edáficos e o grande número de variáveis envolvidas na avaliação da fertilidade do solo tornam insuficiente a utilização isolada de métodos estatísticos convencionais. Nesse sentido, técnicas de análise multivariada, especialmente a Análise de Componentes Principais (ACP), têm sido amplamente empregadas para reduzir a dimensionalidade dos dados, identificar padrões ocultos e selecionar indicadores-chave de qualidade do solo (Zhang et al., 2022; Rahman et al., 2024). Essas ferramentas permitem compreender simultaneamente a interação entre diversos atributos químicos e sua influência sobre os diferentes sistemas de uso da terra.

Embora diversos estudos tenham investigado a qualidade do solo em sistemas agrícolas amazônicos, ainda existem lacunas relacionadas à identificação dos atributos químicos mais sensíveis para monitorar mudanças decorrentes do uso da terra em assentamentos sustentáveis da Amazônia Oriental. Dessa forma, torna-se fundamental compreender como diferentes sistemas produtivos influenciam a fertilidade do solo, subsidiando práticas de manejo capazes de promover a sustentabilidade dos agroecossistemas familiares.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade química do solo em diferentes sistemas de uso da terra por meio de técnicas de análise multivariada, identificando os

atributos químicos mais eficientes na discriminação dos ambientes e seu potencial como indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas familiares do Projeto de Desenvolvimento Sustentável Porto Seguro, município de Marabá, Pará.

MATERIAL E MÉTODOS

A propriedade agrícola familiar estudada localiza-se no município de Marabá – PA. Este estudo foi desenvolvido na propriedade de número 13, pertencente ao Projeto de Desenvolvimento Sustentável Porto Seguro. A área da propriedade agrícola é dividida em cultivos agrícolas anuais, quintal agroflorestal e reserva legal (Figura 1).

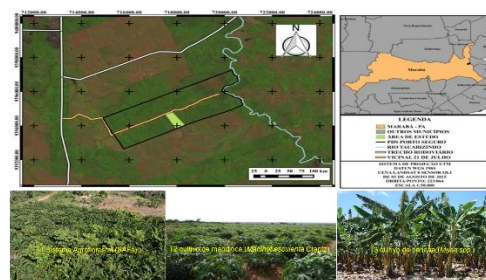


Figura 1. Localização do PDS no município de Marabá e localização da propriedade estudada.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

Segundo Köppen o clima da região é classificado como Tropical Chuvoso com temperatura média de 28 °C e precipitação média anual de 1925,7 mm/ano e é caracterizado por um período menos chuvoso entre os meses de maio a outubro e período mais chuvoso entre os meses de novembro a abril. Segundo EMBRAPA (2007) o solo foi classificado como PVAD – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Os tratamentos foram definidos em: T1 Sistema Agroflorestal (SAFs), T2 cultivo de mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) e o T3 cultivo de banana (*Musa spp.*).

Para o estudo e posterior alcance dos objetivos foram realizadas coletas de solo, a partir da metodologia estabelecida pela EMBRAPA (2017), no qual é necessário a identificação das amostras e do local de coleta. Em campo foram utilizados GPS para a obtenção das coordenadas geográficas, máquinas fotográficas, pá, trado holandês, sacos plásticos para armazenamento das amostras, e na coleta dos dados foram utilizados caderno de campo.

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado com quatro parcelas (repetições) em cada tratamento, a partir disso foram retiradas amostras da camada superficial 0 a 0,20 m de profundidade. No total foram coletadas 32 amostras compostas, ao serem coletadas, foram imediatamente

aconditionadas em sacos plásticos de polipropileno, identificadas e armazenadas até as análises.

Nestas amostras buscou-se avaliar, quanto à qualidade química do solo, os efeitos destes diferentes agroecossistemas. As análises químicas foram realizadas de acordo com Embrapa (2017) e foram determinados: pH em CaCl_2 , matéria orgânica, fósforo assimilável, cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}) pelo método de extração por KCl, K e P extraídos pelo método de Mehlich1. A partir destes resultados, foram determinadas a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions total (T), a saturação por bases (V%) e a saturação por alumínio (m%).

Os dados das análises químicas do solo foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) e homoscedasticidades de variância de Levene ($p > 0,05$). Atendidos a esses dois pressupostos 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, Análise de Componentes Principais (PCA) e Heatmap dos atributos químicos do solo (Z-score). Todas as análises estatísticas e gráficos foram realizadas no software estatístico R, versão 4.3 (R Development Core Team, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de matéria orgânica do solo (MO) diferiram significativamente entre os sistemas avaliados ($p = 0,00019$), evidenciando que o tipo de uso da terra exerceu forte influência sobre a dinâmica do carbono orgânico na camada superficial do solo (Figura 2). O Sistema Agroflorestal (SAFs) apresentou o maior teor médio de MO ($57,03 \pm 1,96 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), diferindo estatisticamente do cultivo de mandioca ($42,42 \pm 1,53 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$) e do cultivo de banana ($40,70 \pm 1,81 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), os quais não diferiram entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Esse resultado demonstra que sistemas produtivos mais diversificados favorecem o acúmulo de carbono orgânico e a manutenção da qualidade do solo, principalmente devido ao aporte contínuo de resíduos vegetais e à maior complexidade estrutural do ecossistema.

A superioridade do SAF pode ser atribuída ao aporte permanente de serapilheira, à elevada renovação radicular e à diversidade funcional das espécies presentes no sistema. Esses fatores aumentam a incorporação de carbono ao solo e favorecem a formação de compostos orgânicos mais estáveis. Segundo Pereira et al., os sistemas agroflorestais promovem maior deposição de resíduos vegetais, maior atividade microbiana e melhor conservação dos estoques de carbono, apresentando desempenho semelhante ao observado em ecossistemas florestais

naturais da Amazônia. Adicionalmente, o mesmo estudo destaca que os SAFs criam microclimas mais estáveis, favorecendo processos biológicos fundamentais para a manutenção da fertilidade e da sustentabilidade dos solos amazônicos.

Resultados semelhantes foram observados por Pereira et al. (2025), em estudo realizado no sudeste paraense, no qual áreas manejadas sob sistemas agroflorestais apresentaram maiores teores de matéria orgânica quando comparadas a agroecossistemas menos diversificados. Os autores atribuíram esse comportamento à elevada produção de biomassa vegetal e à maior eficiência da ciclagem de nutrientes promovida pela diversidade de espécies arbóreas e agrícolas presentes nos SAFs. Segundo os autores, a matéria orgânica constitui um dos principais reservatórios de nutrientes nos solos tropicais, contribuindo diretamente para o aumento da capacidade de troca catiônica, retenção hídrica e estabilidade estrutural do solo.

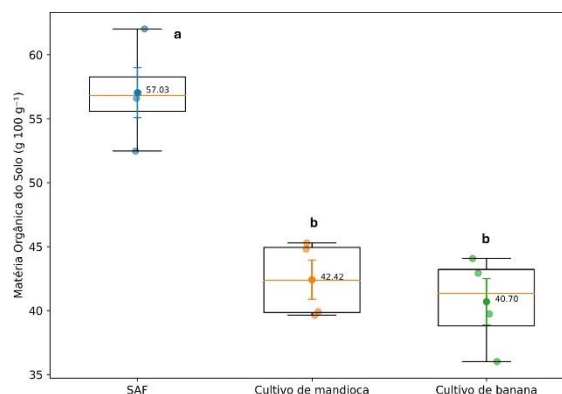


Figura 2. Teores de matéria orgânica (MO) do solo nos sistemas Sistema Agroflorestal (SAF) (T1), Cultivo de Mandioca (T2) e Cultivo de Banana (T3).

Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

As caixas representam o intervalo interquartil, a linha central representa a mediana, os pontos representam observações individuais e os símbolos indicam a média $\pm$ erro-padrão. Letras distintas indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

Autores como Eteckji Fonkeng et al. (2024), reforçam essa interpretação, pois verificaram que sistemas agroflorestais tropicais aumentam significativamente os estoques de carbono orgânico do solo quando comparados a monocultivos agrícolas, promovendo simultaneamente melhorias na fertilidade química e na atividade biológica do solo. Da mesma forma, Fausak et al. (2024), demonstraram que a diversidade vegetal presente em sistemas agroflorestais favorece o acúmulo de matéria orgânica e o desenvolvimento de



comunidades microbianas mais eficientes na ciclagem de nutrientes.

Os menores teores de matéria orgânica observados no cultivo de mandioca sugerem que sistemas agrícolas simplificados possuem menor capacidade de manter fluxos contínuos de carbono para o solo. A menor cobertura vegetal, associada à exportação frequente de biomassa durante a colheita, favorece a intensificação dos processos de decomposição e reduz a estabilidade dos estoques de carbono. O estudo sobre atividade microbiana conduzido na Amazônia Oriental demonstra que monoculturas apresentam menor atividade biológica e menor fertilidade quando comparadas a sistemas agroflorestais e áreas florestais nativas. Além disso, ambientes com menor diversidade vegetal tendem a apresentar comunidades microbianas menos complexas e menor eficiência na incorporação de carbono ao solo.

O cultivo de banana apresentou comportamento intermediário, provavelmente em decorrência da deposição contínua de folhas senescentes, restos de pseudocaules e resíduos culturais. Embora esse aporte orgânico contribua para a manutenção parcial dos estoques de carbono, a menor diversidade funcional do sistema limita a magnitude dos benefícios observados nos SAFs. Estudos recentes demonstram que sistemas perenes podem apresentar melhorias na matéria orgânica do solo quando comparados a cultivos anuais, porém raramente atingem os níveis observados em sistemas agroflorestais diversificados (Kimaro et al., 2024).

Do ponto de vista ecológico, a matéria orgânica representa um dos principais indicadores da qualidade do solo, influenciando diretamente atributos físicos, químicos e biológicos, destacado também pela MO constituir o principal componente responsável pela resiliência dos agroecossistemas frente às mudanças climáticas, atuando na retenção de água, armazenamento de nutrientes e estabilização do carbono (Lal, 2025). De forma complementar, Kabato et al. (2025), demonstraram que incrementos nos teores de matéria orgânica estão diretamente relacionados ao aumento da saúde do solo e à melhoria dos serviços ecossistêmicos em sistemas agrícolas tropicais.

A Análise de Componentes Principais (PCA) evidenciou elevada capacidade de discriminação dos sistemas de uso do solo, uma vez que os dois primeiros componentes explicaram conjuntamente 84,0% da variabilidade total dos dados (Figura 3). Resultado indica que a maior parte da variação dos atributos químicos avaliados foi sintetizada nos eixos PC1 e PC2, conferindo robustez à interpretação multivariada. Em estudos de qualidade do solo, a PCA é amplamente utilizada porque reduz a

dimensionalidade dos dados e permite identificar quais atributos mais contribuem para diferenciar sistemas de manejo, especialmente quando há forte interação entre matéria orgânica, acidez, bases trocáveis e micronutrientes (Jalhoun et al., 2024).

A separação dos tratamentos na ordenação multivariada demonstra que T1 – Sistema Agroflorestal (SAFs) apresentou comportamento químico distinto em relação ao T2 – Cultivo de Mandioca e ao T3 – Cultivo de Banana. Essa diferenciação sugere que o SAF promove maior complexidade funcional no solo, provavelmente associada ao aporte contínuo de serapilheira, raízes finas, resíduos vegetais e maior diversidade de espécies. Esse padrão é coerente com o artigo anexado sobre atividade microbiana em SAFs na Amazônia Oriental, no qual os autores destacam que os SAFs favorecem a deposição de matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes, a estabilidade ecológica e a atividade microbiana do solo (Pereira et al., 2025).

Os vetores associados à matéria orgânica, nitrogênio, cálcio, Ca+Mg, CTC efetiva, CTC total e saturação por bases indicam que esses atributos foram determinantes para a separação dos sistemas produtivos. Em termos ecológicos, isso revela que os atributos ligados à fertilidade natural e à qualidade química do solo responderam fortemente ao tipo de manejo. Estudos recentes reforçam que sistemas agroflorestais tendem a melhorar simultaneamente os estoques de carbono orgânico, a disponibilidade de nutrientes e a funcionalidade biológica do solo quando comparados a monocultivos agrícolas (Ngaba et al., 2024).

O posicionamento do cultivo de mandioca em região distinta da PCA sugere maior simplificação química do solo, possivelmente associada ao menor aporte de resíduos orgânicos, menor cobertura permanente e maior exportação de biomassa. Esse comportamento confirma a tendência observada nos artigos anexados, nos quais monocultivos apresentaram menor atividade microbiana, menor fertilidade e menor capacidade de manutenção da matéria orgânica em comparação aos SAFs (Pereira et al., 2025).

O cultivo de banana apresentou comportamento intermediário, indicando que, embora o sistema forneça resíduos vegetais como folhas e pseudocaules, sua diversidade funcional ainda é inferior à do SAF. Portanto, a banana pode contribuir parcialmente para a manutenção da matéria orgânica e de alguns nutrientes, mas sem alcançar o mesmo nível de complexidade ecológica observado em sistemas agroflorestais multiestratificados. Essa interpretação está alinhada ao estudo anexado sobre fertilidade do solo no sudeste paraense, que destaca que sistemas com maior diversidade vegetal e maior aporte de biomassa tendem a apresentar melhores

teores de matéria orgânica e maior eficiência na ciclagem de nutrientes (Pereira et al., 2023).

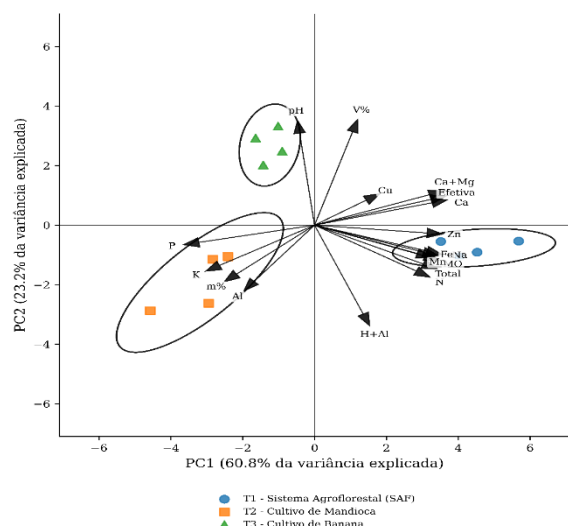


Figura 3. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) dos atributos químicos do solo nos sistemas Sistema Agroflorestal (SAFs), Cultivo de Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) e Cultivo de Banana (*Musa spp.*).

Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

De forma geral, a PCA confirma que o SAFs apresentou maior associação com indicadores de qualidade química do solo, reforçando seu papel como estratégia de restauração produtiva e conservação edáfica em agroecossistemas amazônicos. Esse resultado dialoga com a literatura internacional recente, que reconhece a saúde do solo como componente central da resiliência climática, da produtividade agrícola e da mitigação da degradação ambiental (Kabato et al., 2025).

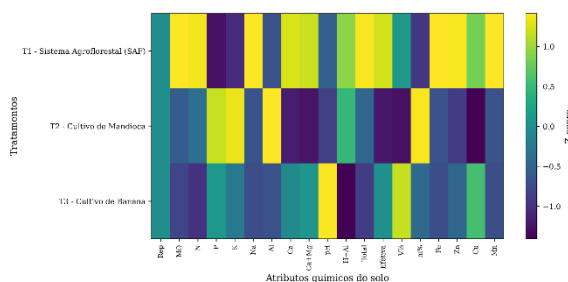


Figura 4. Heatmap dos atributos químicos do solo (Z-score) nos sistemas T1 – Sistema Agroflorestal (SAFs), T2 – Cultivo de Mandioca (*Manihot*

esculenta Crantz) e T3 – Cultivo de Banana (*Musa spp.*)

Os dados foram padronizados por escore Z (Z-score), permitindo a comparação entre variáveis com diferentes magnitudes. Valores positivos indicam atributos com valores acima da média geral, enquanto valores negativos representam atributos abaixo da média. O gradiente de cores expressa a intensidade relativa de cada atributo químico nos diferentes sistemas de uso do solo.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

A análise integrada dos atributos químicos do solo por meio do heatmap baseado em valores padronizados por Z-score evidenciou diferenças marcantes entre os sistemas de uso da terra avaliados, demonstrando que o manejo adotado exerce influência direta sobre a organização funcional da fertilidade do solo (Figura 4). A representação gráfica permitiu identificar padrões de associação entre os atributos químicos e os diferentes sistemas produtivos, revelando que o Sistema Agroflorestal (SAFs) apresentou maior concentração relativa de atributos relacionados à qualidade química do solo, enquanto os cultivos de mandioca e banana exibiram padrões mais restritos ou intermediários de fertilidade. Esse comportamento confirma que sistemas agrícolas mais diversificados promovem ambientes edáficos mais complexos e resilientes, capazes de sustentar simultaneamente múltiplas funções ecossistêmicas.

Os maiores valores padronizados observados para matéria orgânica (MO), cálcio (Ca), cálcio + magnésio (Ca+Mg), capacidade de troca catiônica efetiva (CTCe), saturação por bases (V%) e pH no SAFs refletem a influência da elevada diversidade vegetal e do aporte contínuo de resíduos orgânicos característicos desses sistemas. A deposição constante de serapilheira, associada à renovação radicular e à diversidade funcional das espécies, favorece a formação de agregados estáveis, aumenta a retenção de nutrientes e estimula processos biológicos essenciais à manutenção da fertilidade. Autores como Ngaba et al. (2024), demonstram que sistemas agroflorestais tropicais apresentam maior eficiência na ciclagem biogeoquímica de nutrientes e maior capacidade de acumular carbono orgânico quando comparados a monocultivos agrícolas, resultando em melhorias significativas nos indicadores de qualidade do solo.

Os resultados observados corroboram os estudos conduzidos na Amazônia Oriental, nos quais sistemas agroflorestais apresentaram comportamento semelhante ao de ecossistemas florestais quanto aos indicadores químicos e biológicos do solo. Os trabalhos anexados demonstram que os SAFs favorecem maior atividade microbiana, maior



estoque de carbono e melhor equilíbrio nutricional do solo, evidenciando que a diversificação vegetal atua como mecanismo regulador dos processos ecológicos e da fertilidade edáfica (Visscher et al., 2024). A maior associação entre MO e bases trocáveis observada no heatmap reforça essa interpretação, uma vez que a matéria orgânica constitui o principal reservatório de cargas negativas responsáveis pelo aumento da capacidade de troca catiônica em solos tropicais altamente intemperizados. Além disso, a matéria orgânica exerce papel fundamental na complexação do alumínio tóxico e na manutenção do equilíbrio químico da solução do solo (Haggar et al., 2019).

A distribuição espacial dos atributos também sugere que os sistemas de mandioca apresentaram menor expressão relativa dos indicadores ligados à fertilidade natural. Esse comportamento pode estar associado à menor diversidade vegetal, à reduzida cobertura permanente do solo e à maior exportação de biomassa durante os ciclos produtivos. Em ambientes tropicais úmidos, tais condições favorecem a mineralização acelerada da matéria orgânica e aumentam a susceptibilidade às perdas de nutrientes por lixiviação. Segundo estudos recentes, sistemas simplificados de produção frequentemente apresentam redução da matéria orgânica, menor estabilidade estrutural e menor eficiência na retenção de nutrientes quando comparados a sistemas diversificados (Shang et al., 2024).

O cultivo de banana apresentou comportamento intermediário, caracterizado pela associação moderada com atributos relacionados ao carbono e à fertilidade. Embora a deposição de folhas senescentes e pseudocaules contribua para o retorno parcial de biomassa ao sistema, a menor diversidade florística limita a amplitude dos processos ecológicos observados em sistemas agroflorestais (Abada Mbolu et al., 2016). Trabalhos recentes desenvolvidos em agroecossistemas tropicais demonstram que cultivos perenes apresentam desempenho superior ao de monocultivos anuais na conservação dos atributos químicos do solo; entretanto, sua capacidade de promover múltiplos serviços ecossistêmicos permanece inferior àquela observada em sistemas agroflorestais complexos (Xu et al., 2024).

Outro aspecto relevante evidenciado pelo heatmap refere-se à associação entre micronutrientes (Fe, Mn, Zn e Cu) e os diferentes sistemas produtivos. A distribuição desses elementos sugere que a dinâmica dos micronutrientes está fortemente relacionada ao conteúdo de matéria orgânica, ao pH e à intensidade dos processos biológicos do solo. A literatura recente destaca que sistemas agroflorestais favorecem a manutenção de micronutrientes disponíveis devido à maior atividade biológica, à presença de compostos

orgânicos quelantes e à redução das perdas por erosão e lixiviação (Kumar et al., 2023).

Sob a perspectiva ecológica, o padrão observado na Figura 4 demonstra que os SAFs promovem uma reorganização sistêmica da fertilidade do solo, integrando atributos químicos, biológicos e funcionais em um mesmo ambiente produtivo. Essa capacidade de combinar produção agrícola e conservação dos recursos naturais é apontada como um dos principais benefícios dos sistemas agroflorestais frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela degradação dos solos tropicais. Segundo Munna & Lal (2026), a matéria orgânica e os processos associados à saúde do solo representam a base para a resiliência dos agroecossistemas, influenciando simultaneamente a produtividade, a estabilidade ambiental e a capacidade de adaptação às mudanças climáticas.

CONCLUSÃO

A avaliação integrada dos atributos químicos do solo demonstrou que os diferentes sistemas de uso da terra influenciam significativamente a qualidade edáfica em agroecossistemas familiares da Amazônia Oriental. O Sistema Agroflorestal (SAF) apresentou os maiores teores de matéria orgânica e maior associação com atributos relacionados à fertilidade natural, evidenciando maior capacidade de conservação dos nutrientes e manutenção dos processos ecológicos do solo quando comparado aos cultivos de mandioca e banana.

As análises multivariadas confirmaram elevada eficiência na discriminação dos sistemas produtivos, permitindo identificar a matéria orgânica, o cálcio, a capacidade de troca catiônica e a saturação por bases como os principais indicadores da qualidade química do solo. A PCA e o Heatmap evidenciaram que o SAF apresentou o perfil químico mais equilibrado e funcional, refletindo maior complexidade ecológica, eficiência na ciclagem de nutrientes e potencial de manutenção da saúde do solo.

Os resultados reforçam o papel dos sistemas agroflorestais como estratégia sustentável para a agricultura familiar amazônica, promovendo simultaneamente conservação da fertilidade, aumento dos estoques de carbono, fortalecimento dos serviços ecossistêmicos e maior resiliência frente às mudanças climáticas. Dessa forma, os SAFs constituem uma alternativa tecnicamente viável para conciliar produção agrícola, sustentabilidade ambiental e segurança alimentar nos assentamentos rurais da Amazônia.

REFERÊNCIAS



- ABADA MBOLO, M. M.; ZEKENG, J. C.; MALA, W. A.; et al. The role of cocoa agroforestry systems in the conservation of forest tree diversity in central Cameroon. *Agroforestry Systems*, v. 90, n. 4, p. 577-590, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9945-8>
- BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; et al. Soil quality and indicators revisited: progress, limitations and perspectives. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 178, p. 108947, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108947>.
- EDDY, W. C.; YANG, W. H. Improvements in soil health and soil carbon sequestration by an agroforestry system for food production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 333, p. 107945, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107945>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1085209>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- ETECKJI FONKENG, E.; CHEVALLIER, T.; SAUVADET, M.; et al. Dynamics of soil organic carbon stocks after conversion of savanna agroforestry systems to cocoa in central Cameroon. *Geoderma Regional*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00758>
- FAUSAK, L. K.; BRIDSON, N.; DIAZ-OSORIO, F.; et al. Soil health – a perspective. *Frontiers in Soil Science*, v. 4, p. 1462428, 2024. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1462428>
- HAGGAR, J.; PONS, D.; SAENZ, L.; VIDES, M. Contribution of agroforestry systems to biodiversity sustainability in fragmented forest landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 283, p. 106567, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.06.006>
- JALHOUM, M. E.; ABDELLATIF, M. A.; MOHAMED, E. S.; et al. Multivariate analysis and GIS approaches for modeling and mapping soil quality and land suitability in arid zones. *Heliyon*, v. 10, n. 5, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27577>
- JINGER, D.; KAUSHAL, R.; KUMAR, R.; et al. Rehabilitation of degraded land through agroforestry in India: achievements, current understanding and future prospects. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 11, p. 1088796, 2023. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1088796>
- KABATO, W.; HAILEGNAN, N.; MUTUM, L.; MOLNAR, Z. Managing soil health for climate resilience and agricultural productivity in a changing environment. *Science of The Total Environment*, v. 1000, p. 180460, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180460>
- KABATO, W. S.; HAILEGNAN, N.; CHAFFAMO, T. E.; et al. Microalgae-based strategies for soil health and crop productivity: mechanisms, challenges and pathways to climate-resilient agriculture. *Agronomy*, v. 15, n. 11, p. 2669, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy15112669>
- KIMARO, O. D.; DESIE, E.; KIMARO, D. N.; et al. Salient features and ecosystem services of tree species in indigenous mountain agroforestry systems of northeastern Tanzania. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 6, p. 1082864, 2024. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1082864>
- KUMAR, A.; DAS, A.; SINGH, D.; et al. Restoring soil health in degraded lands: a microbiological perspective. *Land Degradation & Development*, v. 34, n. 17, p. 5155-5170, 2023. <https://doi.org/10.1002/ldr.4851>
- LAL, R. Soil organic matter: the heart of soil health. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 80, n. 4, p. 320-326, 2025. <https://doi.org/10.1080/00224561.2025.2572280>
- MUKHERJI, A.; MARSHALL, S.; ARANGO, J.; et al. 2024 *Innovative Agenda Report: Agriculture*. [S.l.]: CGIAR, 2024. <https://cgspace.cgiar.org/bitstreams/88c93900-98a6-46cd-929c-d855397b7a5a/download>
- MUNNA, M. N. H.; LAL, R. Long-term effects of organic inputs on soil carbon and nitrogen sequestration in a temperate agroecosystem. *Soil Use and Management*, v. 42, n. 1, e70161, 2026. <https://doi.org/10.1111/sum.70161>
- NGABA, M. J. Y.; MGELWA, A. S.; GURMESA, G. A.; et al. Meta-analysis reveals differential effects of agroforestry on soil properties in different zonobiomes. *Plant and Soil*, v. 496, n. 1, p. 589-607, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06385-w>
- PEREIRA, G.; FERREIRA, J.; PINTO, R.; et al. Fertilidade do solo na camada superficial em diferentes agroecossistemas no Sudeste paraense. *Peer Review*, n. 21, p. 455-468, 2023. <https://doi.org/10.53660/1114.prw2653>
- PEREIRA, G. M.; KAIANO, M. D. L.; SILVA, P. D. L.; et al. Atividade microbiana e carbono do solo em sistemas agroflorestais na Amazônia Oriental: estudo de caso em Marabá, Pará. *Revista de Geopolítica*, v. 16, n. 5, e1064, 2025. <https://doi.org/10.56238/revgeov16n5-219>



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

RAHMAN, F., KHAN, M. A. R., & TASNEEM, Z. Soil classification and crop cultivation prediction: a comparative study of machine learning models. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 11(117), 1143, 2024.

<http://dx.doi.org/10.19101/IJATEE.2024.111100127>

SINGH, N. R.; SINGH, A.; DEVI, N. P.; KUMAR, Y. B.; SANGMA, R. H. C.; PHILANIM, W. S.; et al. Agroforestry for soil health. In: *Agroforestry*. [S.l.]: Wiley, 2024. p. 255-283. <https://doi.org/10.1002/9781394231164.ch9>

SHANG, Y.; OLESEN, J. E.; LÆRKE, P. E.; MANEVSKI, K.; CHEN, J. Perennial cropping systems increased topsoil carbon and nitrogen stocks compared with annual systems: a nine-year field study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 365, p. 108925, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108925>

VISSCHER, A. M.; MELI, P.; FONTE, S. J.; et al. Agroforestry systems enhance biological activity, diversity, and soil-based ecosystem functions in mountain agroecosystems of Latin America: a meta-analysis. *Global Change Biology*, v. 30, n. 1, e17036, 2024. <https://doi.org/10.1111/gcb.17036>

XU, C.; XUE, Z.; JIANG, M.; et al. Simulation of the potential impacts of climate change on habitats and carbon benefits of mangroves in China. *Global Ecology and Conservation*, v. 54, e03048, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03048>

ZHANG, L., ZHANG, T., & GUO, L. Research on predicting soil degradation in tea-producing areas of Qinling, China, based on deep learning. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1649528, 2025. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1649528>