



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM QUÍMICA

EVELIN DOS SANTOS MURARO

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO
EM SISTEMAS DE MANEJO ORGÂNICO E CONVENCIONAL

Dourados/MS
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM QUÍMICA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO
EM SISTEMAS DE MANEJO ORGÂNICO E CONVENCIONAL

Trabalho de conclusão de curso II,
desenvolvido na Universidade Federal da
Grande Dourados, como requisito parcial
para conclusão de curso.

Orientadora: Prof. Dra. Daniele Mignolo dos Santos

Área de concentração: 50101030 Química do solo.

Dourados/MS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

	Muraro, Evelin Dos Santos Análise comparativa das propriedades químicas do solo em sistema de manejo orgânico e convencional. [recurso eletrônico] / Evelin Dos Santos Muraro. – Dourados, 2025. Arquivo em formato pdf. Orientadora: Profa. Dra. Daniele Mignolo dos Santos. TCC (Graduação em Química) – Universidade Federal da Grande Dourados. 1. Solo - fertilidade. 2. Manejo orgânico - convencional. I. Título.
--	--

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

Evelin dos Santos Muraro

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO EM SISTEMAS
DE MANEJO ORGÂNICO E CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel(a) em Química
junto à Universidade Federal da Grande
Dourados.

Aprovada em 11/12/2025.



Documento assinado digitalmente
DANIELE MIGNOLO DOS SANTOS
Data: 16/12/2025 21:46:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Daniele Mignolo dos Santos



Documento assinado digitalmente
JOAO AUGUSTO MACHADO DA SILVA
Data: 17/12/2025 18:39:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Tecnólogo João Augusto Machado da Silva



Documento assinado digitalmente
HEBERTH JULIANO VIEIRA
Data: 18/12/2025 15:46:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Heberth Juliano Vieira

**Dourados
2025**

“Dê-me, Senhor, agudeza para entender, capacidade para reter, método e faculdade para aprender, sutileza para interpretar, graça e abundância para falar. Dê-me, Senhor, acerto ao começar, direção ao progredir e perfeição ao concluir.”

São Tomás de Aquino

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus, que foi minha força quando eu fraquejei e meu refúgio quando o caminho pareceu pesado demais. Foi Ele quem renovou minha coragem todos os dias e colocou as pessoas certas ao meu lado para que este sonho se tornasse possível.

Aos meus pais, Vilson e Emilene, que mesmo de longe nunca deixaram faltar amor, apoio e sacrifício. Vocês enfrentaram comigo cada distância, cada dificuldade e cada renúncia para que eu pudesse permanecer aqui. Tudo o que sou e tudo o que conquisto carrega um pedaço de vocês. Obrigada por acreditarem em mim mesmo nos dias em que eu duvidei.

À minha irmã Elohá, com quem dividi não apenas um lar, mas também risadas, brigas, caos, cumplicidade e muitos momentos que só quem vive junto entende. Mesmo quando me tirou do sério e não foram poucas vezes, você esteve presente, me fazendo companhia nos dias longos e me lembrando que, no fim das contas, família é insubstituível.

Aos meus amigos, que foram abrigo, companhia e alegria durante todos esses anos. Aos que estiveram por perto, nos momentos difíceis e celebrando comigo cada pequena vitória. E aos que ficaram longe, mas cuja amizade permaneceu intacta, como se nenhuma distância fosse capaz de diminuir o que construímos. Vocês fizeram essa caminhada mais leve.

Ao meu namorado, Emanuel, que chegou no semestre mais desafiador de toda a graduação e, ainda assim, escolheu ficar. Obrigada por me acompanhar na reta final, por ser calma quando eu sou tempestade, por me dar colo nos dias mais cansativos e por acreditar que eu conseguiria quando eu só via exaustão. Sua presença fez toda diferença.

À minha orientadora, Professora Daniele, pela paciência infinita e pela coragem de trilhar comigo caminhos pouco explorados na nossa área. Obrigada por não desistir do meu trabalho, por me oferecer direção quando eu me perdia e por confiar no meu potencial mesmo entre tantas incertezas.

Agradeço também ao João, técnico do laboratório de fertilidade de solos, pela dedicação e assistência fundamental durante todas as etapas práticas das análises

realizadas neste trabalho. Estendo minha gratidão ao Professor Hebert, cuja contribuição foi essencial para a interpretação dos resultados, especialmente na orientação das análises estatísticas. Seu olhar ampliou a qualidade científica deste estudo e enriqueceu minha formação acadêmica.

Agradeço à Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) pelo apoio institucional e pela excelente infraestrutura disponibilizada ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Estendo meus agradecimentos ao Laboratório de Análise de Fertilidade do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA/UFGD), pela cessão do espaço físico, dos equipamentos e dos insumos necessários à realização das análises laboratoriais, bem como pelo suporte técnico prestado durante toda a etapa experimental.

A todos os professores que passaram pela minha vida acadêmica, deixo minha profunda gratidão. Cada palavra, cada disciplina e cada gesto contribuíram para formar quem eu sou hoje, não só como profissional, mas como pessoa.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo nesta jornada. Cada incentivo, cada abraço, cada gesto de carinho se transforma agora em parte desta conquista. Este trabalho é meu, mas também é de vocês.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo comparar as propriedades químicas de solos sob manejo predominantemente orgânico e convencional, com ênfase na disponibilidade de macronutrientes, acidez, matéria orgânica e atributos de fertilidade. Inicialmente, foram apresentadas as bases conceituais da fertilidade do solo, destacando a influência dos macronutrientes, do pH e da matéria orgânica nos processos de nutrição vegetal. As amostras foram coletadas em áreas agrícolas com diferentes manejos, preparadas conforme metodologias de destorroamento, secagem, peneiramento e análises químicas seguindo protocolos da Embrapa, incluindo determinações de pH, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, matéria orgânica e análises estatísticas multivariadas (PCA e HCA). Os resultados demonstraram diferenças marcantes entre os sistemas. O solo predominantemente orgânico apresentou pH mais elevado, ausência de alumínio trocável, maiores teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e matéria orgânica, além de maior soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%). Em contraste, o solo convencional apresentou elevada acidez, altos teores de alumínio trocável e baixas concentrações de nutrientes essenciais, indicando baixa fertilidade global. As análises de PCA e HCA reforçaram a separação clara entre os sistemas, evidenciando que o manejo predominantemente orgânico favorece a melhoria estrutural e química do solo. Conclui-se que práticas orgânicas proporcionam maior estabilidade, retenção de nutrientes e redução da acidez, promovendo condições mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal.

ABSTRACT

This study aimed to compare the chemical properties of soils under predominantly organic and conventional management systems, with emphasis on macronutrient availability, acidity, organic matter, and fertility attributes. Initially, the conceptual foundations of soil fertility were presented, highlighting the influence of macronutrients, pH, and organic matter on plant nutrition processes. Soil samples were collected from agricultural areas under different management systems and prepared according to standard procedures of air-drying, disaggregation, sieving, and chemical analysis following Embrapa protocols, including determinations of pH, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, aluminum, organic matter, and multivariate statistical analyses (PCA and HCA). The results showed marked differences between the systems. The predominantly organic soil exhibited higher pH values, absence of exchangeable aluminum, higher levels of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and organic matter, as well as greater sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), and base saturation (V%). In contrast, the conventional soil showed high acidity, elevated exchangeable aluminum levels, and low concentrations of essential nutrients, indicating low overall fertility. PCA and HCA analyses reinforced the clear separation between the systems, demonstrating that predominantly organic management favors improvements in soil chemical and structural quality. It is concluded that organic practices provide greater stability, nutrient retention, and acidity reduction, promoting more favorable conditions for plant development.

LISTA DE ABREVIACES

NPK	Fertilizante composto por Nitrognio, Fósforo e Potássio
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
SMP	Solu Tampo SMP (Shoemaker, McLean e Pratt)
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> (Análise de Componentes Principais)
HCA	<i>Hierarchical Cluster Analysis</i> (Análise Hierárquica de Agrupamento)
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
SB	Soma de Bases Trocáveis
V%	Satura por Bases
MOS	Matria Orgânica do Solo
H⁺ + Al³⁺	Acidez Potencial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Tipos de solo	11
1.2. Solos orgânicos	12
1.3. Adubação	13
1.3.1. Tipos de adubação.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivos Específicos	15
3. PARTE EXPERIMENTAL	16
3.1. Coleta e amostragem do solo.....	16
3.2. Determinação do pH em CaCl ₂	17
3.3. Determinação do pH em SMP	17
3.4. Determinação de íons fosfato	18
3.5. Determinação dos íons cálcio e magnésio trocáveis	18
3.6. Determinação de potássio	18
3.7. Determinação de alumínio trocável	19
3.8. Determinação do Carbono Orgânico do Solo	19
3.9. Análise estatística	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1. Determinação do pH do solo	21
4.2. Determinação de Fósforo	24
4.3. Determinação de Potássio, Cálcio e Magnésio	26
4.4. Determinação de Alumínio	28
4.5. Determinação de Matéria Orgânica no solo	30
4.6. Determinação de SB, CTC e V%	32
4.7. Análise de variância	34
4.8. Análise de componentes principais	36
4.9. Análise Hierárquica de agrupamento	38
5. CONCLUSÃO	40
6. REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

No Brasil a institucionalização da agricultura de base ecológica ocorreu com o decreto da Lei Federal 10.831 de 23 de dezembro 2003 (Brasil, 2003), que qualifica diferentes modelos alternativos de produção ecológica sob o nome da produção orgânica: agricultura orgânica, biodinâmica, permacultura, agricultura natural, entre outros. De acordo com essa Lei, “a produção denominada orgânica, é fruto do conjunto das agriculturas de base ecológica que busca conciliar autonomia alimentar e renda, com o respeito aos limites do meio natural ou ecológico, se propõe a resgatar e a redefinir o patrimônio cultural das comunidades locais, orientando a produção para múltiplos mercados que inclui formas inovadoras de relação entre produtores e consumidores”¹.

A demanda por produtos orgânicos é relacionada aos consumidores do mercado nacional e internacional cada vez mais interessados na qualidade dos alimentos e em minimizar os impactos da agricultura produtivista no ambiente¹.

Esses alimentos (frutas, vegetais, carnes, ovos, etc.) tendem a ser mais saudáveis por não terem resíduos químicos, permitindo o consumo integral (casca, polpa), e são produzidos com práticas sustentáveis, beneficiando o meio ambiente e a saúde do trabalhador e consumidor.

O avanço e a consolidação dos sistemas de produção orgânica no Brasil, reforçam a importância de compreender os fundamentos que sustentam a produtividade e a sustentabilidade de todos modelos agrícolas. Entre esses fundamentos, a fertilidade do solo ocupa papel central, pois é a partir dela que se torna possível uma produção orgânica capaz de manter equilíbrio ecológico, preservar os recursos naturais e garantir alimentos de qualidade. Assim, ao considerar a diversidade de práticas presentes na agricultura, tanto como o manejo predominantemente orgânico ou não orgânico, torna-se essencial aprofundar a discussão sobre como o solo é cuidado, recuperado e nutrido para sustentar esses sistemas produtivos¹.

Entende-se por fertilidade do solo a capacidade que o mesmo tem em disponibilizar nutrientes para a absorção das plantas, favorecendo assim sua nutrição e desenvolvimento. Tal processo, requer a disponibilidade de elementos essenciais: os macronutrientes e micronutrientes. Havendo a ausência ou deficiência de algum desses nutrientes, o desenvolvimento das plantas será prejudicado².

Os macronutrientes são absorvidos em maiores quantidades pela planta: íons nitrato, íons fosfato e os íons magnésio, cálcio e potássio. Os íons ferro, manganês, cobre e zinco são considerados micronutrientes, os quais são absorvidos em menores quantidades³.

Um elemento é considerado essencial quando faz parte de uma reação do metabolismo da planta, possuindo assim um efeito direto em sua vida, não podendo ser substituído por nenhum outro constituinte⁴.

Mas, uma acumulação excessiva de micronutrientes nos tecidos vegetais pode levar à toxidez para as plantas e assim, prejudicar o seu desenvolvimento⁴.

A maioria dos solos brasileiros, como os solos do cerrado, apresentam pH ácido, com níveis tóxicos de íons alumínio, e com baixos teores de íons cálcio e de íons magnésio. A acidez de um solo é devida aos componentes ácidos presentes nos solos, como fertilizantes nitrogenados e ácidos orgânicos. A correção da acidez é necessária para melhorar o aproveitamento dos fertilizantes e alcançar uma maior produtividade das culturas⁵.

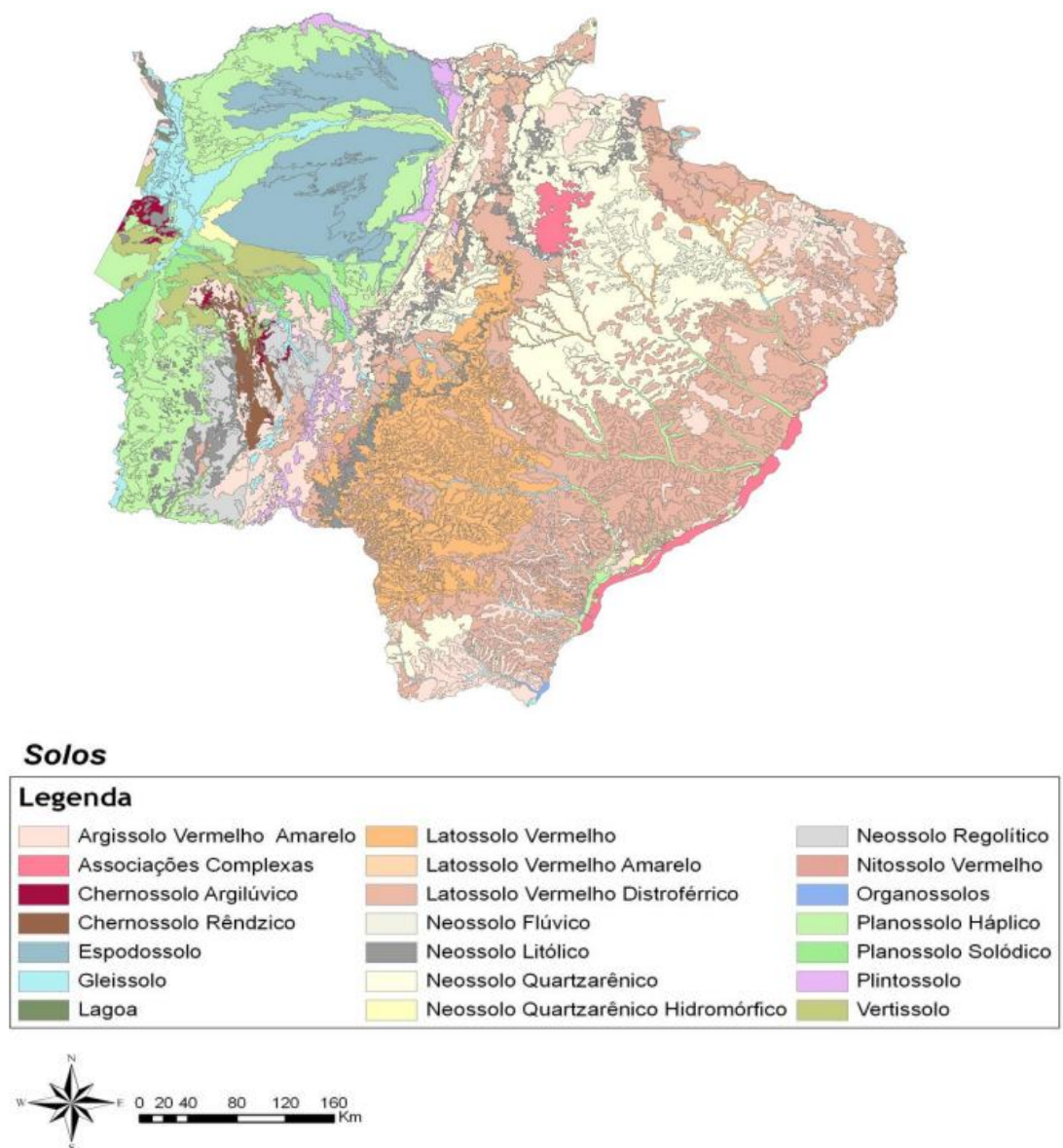
A análise química do solo é um meio fundamental para orientar a adubação, permitindo identificar deficiências de nutrientes e definir as doses adequadas de corretivos e fertilizantes. Além disso, a análise permite quantificar o alumínio trocável, cuja presença em concentrações elevadas pode causar toxicidade às plantas e comprometer o desenvolvimento das culturas.

1.1 Tipos de solo

Solos Minerais (convencionais)

São a maioria absoluta no Brasil. Formados a partir da desintegração de rochas, são compostos principalmente por partículas minerais: areia, silte e argila. O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS/Embrapa) os organiza em 12 classes, sendo possível observar na Figura 1 algumas delas⁶:

Figura 1. Mapa de solo do estado do Mato Grosso do Sul.



Fonte: <https://www.imasul.ms.gov.br/wp-content/uploads/2016/02/Geoambientes-da-Faixa-de-Fronteira-Versao-2016.pdf>

Latossolos: Solos muito evoluídos e profundos. São muito porosos e bem drenados, geralmente têm baixa fertilidade natural. São os mais importantes para a agricultura tropical.

Argissolos: possuem diferença na quantidade de argila, existe uma camada superficial mais arenosa e uma camada subsuperficial com grande acúmulo de argila, fazendo com que o solo desenvolva texturas diferentes.

Neossolos: são solos jovens, rasos e pouco desenvolvidos, possuem poucas camadas formadas, A sua fertilidade varia muito com a rocha que o originou.

Nitossolos: solos profundos, com alto teor de argila, mas que são bem drenados e estruturados, tendem a ser mais férteis que os Latossolos, formados geralmente a partir de rochas ricas como o basalto, como exemplo: “terra roxa”

1.2. Solos Orgânicos

Solos orgânicos são solos que contêm uma alta concentração de matéria orgânica, podendo ser restos vegetais e animais em decomposição.

São solos essencialmente formados por material orgânico, geralmente mal drenados e ricos em matéria orgânica, comuns em áreas de pântano ou com alto lençol freático, onde a decomposição da matéria orgânica é lenta devido à falta de oxigênio.

A variação nos tipos de solo, desde os maduros e com baixa fertilidade natural, até os mais jovens ou ricos em nutrientes, dita a necessidade de intervenção para a produção agrícola.

O estado do Mato Grosso do Sul apresenta solos variados, com destaque para os Latossolos, comuns nas áreas de cerrado, profundos e bem drenados, porém pobres em nutrientes. Também são frequentes os Argissolos, mais suscetíveis à erosão, e, nas áreas de planície do Pantanal, solos como Neossolos, que são mais jovens e sujeitos a inundações. Essa diversidade exige manejo adequado para garantir boa produtividade agrícola⁷.

É por isso que se faz necessário a adubação, ela visa corrigir as deficiências diagnosticadas pela análise química do solo, garantindo a produtividade. A escolha entre adubos minerais e adubos orgânicos deve ser uma decisão de manejo baseada nas necessidades específicas do solo e da cultura.

1.3. ADUBAÇÃO

A adubação é uma prática agrícola que consiste na adição de nutrientes ao solo com o objetivo de suprir as necessidades nutricionais das plantas e manter ou elevar a fertilidade do solo. Esse processo busca restabelecer o equilíbrio entre os elementos minerais retirados pelas colheitas e aqueles disponíveis no solo, assegurando a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas⁸.

O princípio da adubação baseia-se na interação entre o solo, a planta e o fertilizante. O solo atua como meio físico e químico de sustentação, enquanto o fertilizante fornece nutrientes essenciais que podem estar ausentes ou em quantidades insuficientes. A eficiência da adubação depende de fatores como o tipo de solo, o teor de matéria orgânica, as condições climáticas e o manejo adotado⁹.

A análise química do solo é, portanto, uma etapa indispensável, pois permite determinar a disponibilidade de nutrientes e definir a dose adequada de adubo a ser aplicada¹.

A adubação influencia diretamente os fluxos de matéria e energia no sistema solo-planta, uma vez que os nutrientes adicionados participam dos ciclos biogeoquímicos, promovendo o crescimento vegetal e contribuindo para a formação de matéria orgânica, que retorna ao solo após a decomposição¹⁰.

Assim, ela integra-se ao funcionamento natural dos ecossistemas agrícolas, podendo favorecer tanto a produtividade quanto a conservação do solo quando realizada de forma racional.

1.3.1 Tipos de adubação

De acordo com sua origem e modo de aplicação, a adubação pode ser classificada em diferentes tipos:

- **Adubação orgânica:** utiliza materiais de origem animal ou vegetal, como esterco, compostos e restos das culturas. Além de fornecer nutrientes, melhora as propriedades físicas e biológicas do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e estimulando a atividade microbiana⁹.
- **Adubação mineral ou química:** emprega fertilizantes industriais, formulados a partir de compostos minerais solúveis, como os de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK's). São mais concentrados e permitem respostas rápidas das plantas, sendo amplamente usados na agricultura intensiva⁸.
- **Adubação verde:** consiste no cultivo de plantas leguminosas ou outras espécies que, ao serem incorporadas ao solo, aumentam o teor de matéria orgânica e disponibilizam nutrientes, especialmente o nitrogênio, por meio da fixação biológica⁹.

Quanto ao momento de aplicação, a adubação pode ser feita antes ou durante o plantio para suprir o início do ciclo da cultura e em cobertura para complementar a nutrição durante o desenvolvimento das plantas¹¹.

A análise química do solo é, portanto, uma etapa indispensável, pois permite determinar a disponibilidade de nutrientes e definir a dose adequada de adubo a ser aplicada¹.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho será buscar melhorias na relação entre a química do solo convencional e solo predominantemente orgânico, a eficiência na reposição dos macronutrientes, concentrando-se em práticas que otimizem a fertilidade do solo.

2.1. Objetivos específicos

Caracterizar quimicamente diferentes tipos de solo em termos dos macronutrientes essenciais (íons fosfato e os íons magnésio, cálcio e potássio).

Investigar as interações entre os macronutrientes e outros constituintes do solo.

Avaliar a eficácia de diferentes fertilizantes na reposição de macronutrientes, fundamentado na química do solo.

Desenvolver recomendações para as práticas de manejo que maximizem a fertilidade do solo e minimizem impactos ambientais negativos.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Coleta e amostragem do solo

A amostra de solo orgânico foi adubada com cama de frango¹ e fertilizante mineral NPK (4-14-8). Esta amostra de solo foi coletada na área localizada nas coordenadas 22°15'05.4"S, 54°48'58.8"W. O solo recebe o cultivo destinado à plantação de hortaliças.

A amostra de solo convencional foi adubada com fertilizante mineral NPK (5-25-25) e o sal KCl. Esta amostra de solo foi coletada na área localizada nas coordenadas 23°59'54.2"S 55°03'00.1"W., sendo uma área destinada à plantação de tubérculos (mandioca e batata doce).

As amostras de solo foram coletadas em campo, devidamente identificadas. Inicialmente, cada amostra foi espalhada sobre uma folha de papel disposta em uma mesa e submetida ao processo de destorroamento manual, a fim de quebrar os agregados maiores e promover uma secagem uniforme.

A secagem foi realizada ao ar, em ambiente ventilado, evitando-se a exposição direta à luz solar, durante uma semana, conforme as recomendações da literatura.

Após a completa secagem, o material foi transferido para uma bacia de profundidade adequada, na qual se procedeu ao destorroamento com o auxílio de um rolo de madeira, garantindo a homogeneização da amostra.

Em seguida, o solo foi peneirado numa peneira de malha de 2 mm, sendo descartada a fração retida. O material que passou pela peneira corresponde à Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), a qual foi acondicionada em recipiente apropriado, limpo e devidamente identificado, permanecendo armazenada até o momento das análises laboratoriais.

As seguintes análises laboratoriais: pH em SMP e CaCl₂; determinação de Fósforo (P), Potássio (K), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e matéria orgânica

¹ Cama de frango é o material usado para forrar o piso dos galpões de criação de aves, geralmente serragem, palha ou casca de grãos, que fica misturado com fezes, penas e restos de ração de aves, formando um resíduo orgânico rico em nutrientes e amplamente utilizado como fertilizante agrícola.

foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA) na UFGD, seguindo as metodologias padrões da Embrapa Solos.

3.2. Determinação do pH em CaCl_2

A determinação do pH do solo foi realizada utilizando solução de cloreto de cálcio (CaCl_2) $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ como eletrólito de referência.

Com o auxílio de um cachimbo², foi possível cachimbar 10 cm^3 de terra fina seca ao ar (TFSA) em um recipiente, adicionando-se 25 mL da solução de CaCl_2 , mantendo assim a proporção solo:solução de 1:2,5. Em seguida, a suspensão foi agitada em agitador mecânico, para promover a completa dispersão das partículas e deixada em repouso por aproximadamente 30 min, permitindo o equilíbrio entre o solo e a solução.

Após o período de repouso, a leitura do pH foi realizada com o auxílio de um pHmetro devidamente calibrado com soluções tampão padrão de pH 4,0 e 7,0. O eletrodo foi imerso na suspensão, evitando o contato com partículas sólidas e garantindo uma leitura estável.

3.3. Determinação do pH em SMP

Para a análise, utilizou-se a mesma amostra previamente preparada para determinação de pH em CaCl_2 , e adicionados 5 mL da solução tampão SMP (uma mistura composta por 14,58g de p-nitrofenol, 20mL de trietanolamina, 24g de cromato de potássio, 8,0g acetato de cálcio e 424,0g de cloreto de cálcio, tamponada a um pH 7,5). A mistura foi agitada em agitador mecânico por 20 min. Após o período de agitação, a suspensão foi deixada em repouso por 1 hora, até a decantação completa do solo, para prosseguir com a leitura. O valor de pH foi determinado com o auxílio de um pHmetro.

² Na análise de solos, o "cachimbo" é um instrumento volumétrico usado para dosar com precisão pequenas amostras de solo (terra fina seca ao ar) para laboratório, padronizando a quantidade de material (ex: 10ml, 25ml) para análises de fertilidade.

3.4. Determinação de íons fosfato

A determinação de fósforo disponível foi realizada pelo método Mehlich 1, utilizando solução extratora composta por HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹. A extração foi feita adicionando-se 100 mL da solução extratora a 10 cm³ de TFSA, com agitação por cinco minutos e repouso para decantação. Uma alíquota de 5 mL do extrato foi empregada na determinação colorimétrica, baseada na formação do complexo fosfomolibdico reduzido por ácido ascórbico, que produz coloração azul proporcional ao teor de fósforo. Após desenvolvimento da cor por 1 hora, realizou-se leitura em espectrofotômetro, utilizando curva padrão para cálculo da concentração.

3.5. Determinação dos íons cálcio e magnésio trocáveis por espectrofotometria de absorção atômica com chama

Foram cachimbados 5 cm³ de TFSA e 50 mL de uma solução de cloreto de potássio 1 mol L⁻¹. Agitou-se a mistura por 10 min a 200 rpm e deixou-a em repouso por 16 h. Após esse período, 1 mL do sobrenadante foi transferido para frasco plástico com tampa, aos quais foram adicionados 19 mL de uma solução de óxido de lantânio à 0,1% m v⁻¹. A concentração dos íons cálcio e magnésio trocáveis no extrato foi determinada por espectrofotometria de absorção atômica com chama, com uma lâmpada de catodo oco para cada analito, em um comprimento de onda de 422,7 nm para o cálcio e 285,2 nm para o magnésio.

3.6. Determinação de Potássio

O método utiliza a solução extratora Mehlich 1, composta por HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹, na relação solo:extrator de 1:10. Para a extração, 10 cm³ de TFSA foram colocados em erlenmeyer com 100 mL da solução extratora, agitados por cinco minutos e deixados em repouso para decantação por uma noite. A porção do extrato não utilizada para fósforo (aprox. 20 mL) foi reservada para determinação de

K⁺. A quantificação foi feita em fotômetro de chama, após calibração com soluções padrão de potássio entre 0,1 e 0,4 mmol K⁺/L.

3.7. Determinação de Alumínio Trocável no Solo

Foram cachimbados 5 cm³ de TFSA e 50 mL de uma solução de cloreto de cálcio 1 mol L⁻¹. Agitou-se a mistura por 10 min a 200 rpm e deixou-a em repouso por 16h. Após o repouso, titulou-se 25 mL do extrato com uma solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹, usando como solução indicadora azul de bromotimol.

3.8. Determinação do Carbono Orgânico do solo

Em recipientes de plástico, foram adicionados 0,5 cm³ de solo e 5 mL de uma solução contendo dicromato de sódio (Na₂Cr₂O₇) 0,2 mol L⁻¹, em meio de solução de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄), em capela de exaustão.

Em seguida, as amostras foram deixadas em repouso por 1 h, para permitir o término da reação, e posteriormente adicionou-se 25 mL de água destilada para a diluição da solução. As suspensões permaneceram em repouso por cerca de 16 h, para a decantação completa dos sólidos. Após esse período, a concentração de carbono orgânico foi determinada por espectrofotometria, em comprimento de onda de 650 nm, utilizando soluções para construção da curva analítica. Os resultados foram obtidos em gramas de carbono por quilograma de solo (g kg⁻¹).

3.9. Análise estatística

As análises estatísticas foram conduzidas no software R (versão 4.5.2), empregando rotinas específicas para avaliar a variabilidade química do solo e comparar os sistemas de manejo predominantemente orgânico e convencional.

Inicialmente, os dados foram inspecionados quanto à presença de valores ausentes e, posteriormente, as variáveis numéricas foram padronizadas por meio da transformação *z-score* para as análises multivariadas, de modo a eliminar efeitos de escala entre os parâmetros.

A Análise de Componentes Principais (PCA)¹² foi realizada utilizando a função `prcomp()`, considerando a matriz de dados padronizada. A PCA foi empregada para identificar padrões multivariados e reduzir a dimensionalidade do conjunto de variáveis químicas, permitindo visualizar a separação entre os sistemas de manejo. Foram examinados os *scores* e *loadings*, bem como a variância explicada por cada componente principal. Os gráficos biplot foram gerados com o pacote *factoextra*, possibilitando a representação simultânea das amostras e das variáveis no espaço multivariado.

A Análise Hierárquica de Agrupamento (HCA)¹³ foi executada com base na matriz de distâncias euclidianas calculadas a partir dos dados padronizados. O agrupamento foi realizado pelo método de Ward (Ward.D2), por ser adequado para dados quantitativos e por minimizar a variância dentro dos grupos. O dendrograma foi construído com a função `hclust()` e visualizado com `fviz_dend()` (pacote *factoextra*), permitindo avaliar a formação de grupos segundo a similaridade química entre as amostras.

Para comparação univariada entre os sistemas de manejo, foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) de um fator, considerando cada variável química individualmente como resposta e o tipo de manejo (predominantemente orgânico ou convencional) como fator fixo. As ANOVAs foram executadas com a função `aov()`, e a significância estatística foi avaliada ao nível de 5% ($p < 0.05$). Em casos de distribuição não normal ou ausência de homogeneidade de variâncias, os resultados foram confirmados por meio da inspeção gráfica dos resíduos.

Todos os gráficos (PCA, HCA e boxplots) foram produzidos no R utilizando os pacotes `ggplot2`¹⁴ e *factoextra*¹⁵. Esses procedimentos estatísticos foram empregados visando compreender a estrutura dos dados, identificar diferenças entre os sistemas de manejo e caracterizar o comportamento integrado das variáveis químicas do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas as seguintes análises do solo: medidas de pH, determinação dos íons Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis, determinação da concentração dos macronutrientes (íons K^+ e íons PO_4^{3-}) e matéria orgânica.

4.1 Determinação do pH do solo

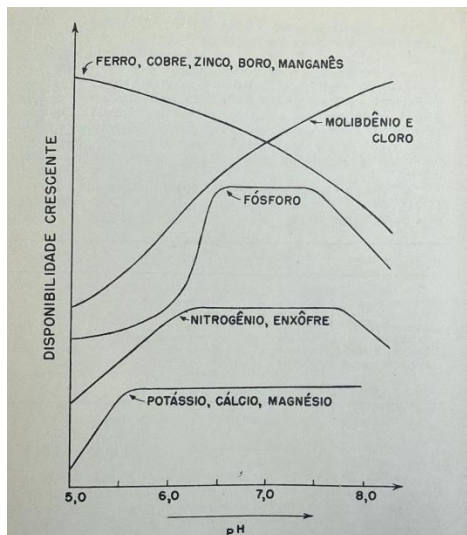
O pH do solo é uma medida que indica o nível de acidez ou alcalinidade do solo, utilizando uma escala que varia de 0 a 14, considera-se um pH neutro tendo valor 7,0. Valores acima de 7,0 são alcalinos e abaixo desse valor são ácidos. O pH é determinado pela medida da concentração efetiva de íons H^+ presentes no solo.

O pH do solo afeta diretamente a solubilidade dos nutrientes, determinando se estarão disponíveis para a absorção pelas plantas. A faixa ideal de pH para o desenvolvimento das plantas é de 5,5 à 6,5.

Os solos ácidos apresentam problemas para a agricultura porque as plantas não se desenvolvem bem nestas condições de acidez, tornando a produtividade das lavouras muito baixa. O excesso de íons H^+ disponibilizará micronutrientes como os íons Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , livres na solução do solo provocando um efeito de toxicidade para as plantas¹⁸.

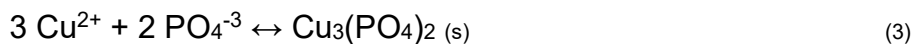
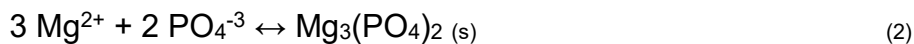
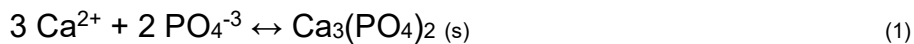
A Figura 2 ilustra a influência do pH sobre a absorção dos diversos nutrientes. “As plantas têm maior facilidade para absorver íons fosfatos, por exemplo, quando o pH está entre 6,5 e 7,5. Abaixo desse intervalo o fosfato solúvel adicionado na adubação é precipitado pelos compostos de ferro e de alumínio que então entram em solução. Por outro lado, a partir do pH 6,0-6,5 o cálcio é que passa a controlar o aproveitamento dos íons fosfato devido à possibilidade de formação de fosfato poucos solúveis¹⁸.”

Figura 2. Influência do pH na disponibilidade dos nutrientes.



Fonte: MALAVOLTA, E. **Manual de Química Agrícola: Adubos e Adubação**. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.

Um solo com um pH alcalino poderá diminuir a concentração de íons fosfato devido à sua precipitação com os íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e com os micronutrientes, como os íons Fe^{3+} e Cu^{2+} , formando sólidos que tornarão esses íons indisponíveis para as plantas, de acordo com as equações apresentadas abaixo¹⁸.



Além disso, poderão precipitar os hidróxidos dos íons Mg^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , devido ao excesso de íons hidroxila (OH^-) em pH alcalino, de acordo com as equações apresentadas abaixo.



A Tabela 1 apresenta os valores de pH determinados nas amostras de solo predominantemente orgânico e solo convencional, utilizando três métodos: pH em solução de CaCl_2 , pH em H_2O e pH em solução de SMP. Observa-se que, em todos os métodos, o solo predominantemente orgânico apresentou valores de pH mais elevados em comparação ao solo convencional, tornando evidente sua menor acidez.

A literatura afirma que solos com histórico de adubação orgânica tendem a apresentar maiores teores de matéria orgânica, o que contribui para a elevação gradual do pH e estabilização da acidez.

Tabela 1. Determinação de pH em amostras de solos

ANÁLISE	SOLO PREDOMINANTEMENTE ORGÂNICO	SOLO CONVENCIONAL
pH CaCl_2	$4,87 \pm 0,25$	$3,71 \pm 0,04$
pH H_2O	$5,60 \pm 0,22$	$4,59 \pm 0,04$
pH SMP	$7,42 \pm 0,08$	$6,82 \pm 0,03$

Fonte: Autora.

O solo convencional apresentou valores de pH mais baixos, indicando alta acidez, típica de áreas com manejo intensivo e pouca reposição de matéria orgânica. Já os valores de pH SMP confirmam que o solo predominantemente orgânico possui menor acidez potencial e, portanto, menor necessidade de calagem.

4.2 Determinação de Fósforo

A Tabela 2 apresenta as concentrações de íons fosfato (PO_4^{3-}), nos solos predominantemente orgânico e convencional.

Tabela 2. Concentração de íons fosfatos presentes no extrato.

ANÁLISE	SOLO PREDOMINANTEMENTE ORGÂNICO	SOLO CONVENCIONAL
PO_4^{3-} (mg dm ⁻³)	176,04	1,947 ± 0,202

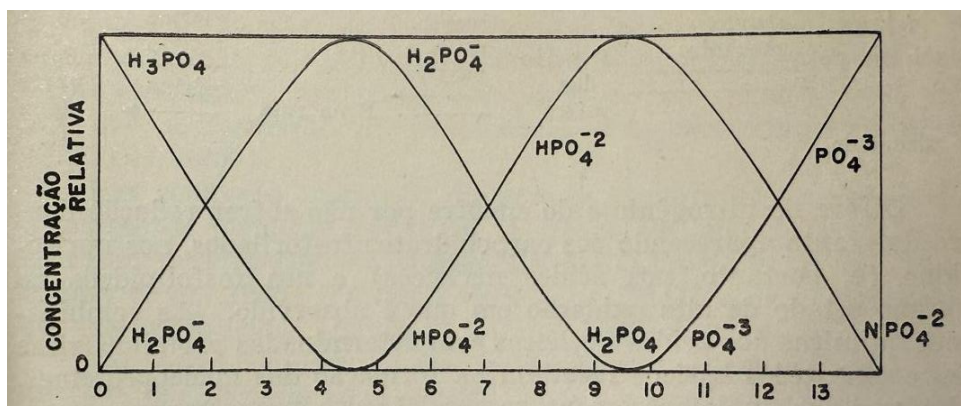
Fonte: Autora

Os teores de íons fosfato disponíveis nas amostras de solo analisadas apresentaram diferenças marcantes entre os sistemas de manejo avaliados. No solo predominantemente orgânico, o teor de íons fosfato foi de 176,04 mg dm⁻³, enquanto no solo convencional foi de 1,947 mg dm⁻³. Essa disparidade evidencia a influência do tipo de manejo e disponibilidade do fósforo no solo.

O fósforo apresenta baixa mobilidade no solo, e sua disponibilidade para as plantas depende das reações que o mesmo estabelece com a matriz sólida do solo, sobretudo com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, além de interações com a matéria orgânica². A literatura destaca que a disponibilidade de íons fosfato pode ser avaliada por métodos de extração química que simulam a capacidade do solo em fornecer o nutriente às plantas, embora esses valores não representem necessariamente o teor disponível absoluto, mas sim uma representação correlacionando com a resposta dos cultivos.

O elevado teor de íons fosfato no solo predominantemente orgânico pode ser atribuído à adição contínua de materiais predominantemente orgânicos e à ausência de adubos minerais solúveis, que podem favorecer a retenção do fósforo em formas orgânicas e pouco estáveis.

Figura 3. Relação entre pH e espécies iônicas do fosfato



Fonte: MALAVOLTA, E. **Manual de Química Agrícola: Adubos e Adubação**. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.

A forma química dos íons fosfatos no solo depende diretamente do pH, pois o ácido fosfórico sofre diferentes etapas de dissociação conforme o meio se torna mais ácido ou mais alcalino. Como se pode observar na Figura 3, em solos ácidos predominam espécies mais protonadas, como $H_2PO_4^-$, enquanto em pH próximo de neutro aumenta a presença de HPO_4^{2-} . Já em condições alcalinas surgem formas mais desprotonadas, como PO_4^{3-} . Essas mudanças de forma química influenciam as reações dos íons fosfatos com minerais do solo. Em pH baixo, o fosfato é retido por íons ferro e íons alumínio, enquanto em pH alto tende a formar precipitados com íons cálcio. Assim, o pH controla tanto a especiação do íon fosfato quanto sua disponibilidade para as plantas.

Estudos indicam que a cama de frango apresenta teores expressivos de fósforo, os quais tendem a se elevar ao longo do processo de compostagem em função da mineralização da matéria orgânica. A cama in natura já possui concentrações relevantes de P disponível e, após cerca de 180 dias de compostagem, os teores de fósforo assimiláveis podem ultrapassar 50 g kg^{-1} , refletindo alta concentração de fosfato no composto final. Desta forma, a cama de frango compostada configura-se como importante fonte de fósforo para o solo, elevando a

disponibilidade de fosfato às culturas. Porém, seu uso deve ser manejado moderadamente, para evitar excesso de P e potenciais impactos ambientais¹⁹.

4.3 Determinação de Potássio, Cálcio e Magnésio

A Tabela 3 apresenta as concentrações de íons potássio (K^+), Cálcio (Ca^{2+}) e Magnésio (Mg^{2+}) nos solos predominantemente orgânico e convencional.

De modo geral, o solo predominantemente orgânico apresentou valores significativamente maiores para todos os nutrientes analisados, demonstrando melhor fertilidade e maior capacidade de fornecer nutrientes às plantas.

As formas, absorvidas pelas plantas, de cálcio, magnésio e potássio, são as formas iônicas, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , existentes na solução do solo.

“O potássio no solo ocorre predominantemente na forma trocável, sendo sua disponibilidade influenciada pela capacidade de troca de cátions (CTC) do solo e pela saturação por bases².” Valores inferiores a $0,15 \text{ cmolc dm}^{-3}$ são geralmente considerados baixos em solos tropicais, indicando possível limitação do nutriente para as culturas.

Tabela 3. Concentrações de íons potássio, cálcio e magnésio presentes no extrato.

ANÁLISE	SOLO PREDOMINANTEMENTE ORGÂNICO	SOLO CONVENCIONAL
K^+ (cmolc dm^{-3})	$0,858 \pm 0,273$	$0,020 \pm 0,008$
Ca^{+2} (cmolc dm^{-3})	$14,1 \pm 1,5$	$0,530 \pm 0,042$
Mg^{+2} (cmolc dm^{-3})	$11,4 \pm 2,7$	$0,141 \pm 0,041$

Fonte. Autora

Na presente análise, o teor de K^+ no solo convencional encontra-se em nível muito baixo, o que pode comprometer a produtividade agrícola caso não seja realizada adubação potássica adequada. Esse resultado pode estar relacionado à

retirada do nutriente pelas colheitas e à baixa reposição por fertilizantes ou matéria orgânica.

Por outro lado, o solo predominantemente orgânico apresentou teor de K^+ considerado adequado, possivelmente devido à adição contínua de resíduos predominantemente orgânicos e à ciclagem de nutrientes promovida pela maior atividade biológica nesse sistema. A maior variabilidade observada pode refletir a heterogeneidade natural da distribuição do potássio em sistemas com manejo menos intensivo.

O baixo teor de potássio trocável observado no solo convencional, mesmo sob adubação com NPK, pode ser explicado por um conjunto de fatores que limitam a eficiência da adubação e a acumulação do nutriente no solo. “A simples aplicação de fertilizantes não garante a manutenção dos teores de K^+ no solo, especialmente quando as doses são insuficientes para repor a exportação pelas culturas ou quando as perdas por lixiviação são elevadas².” Além disso, a priorização da adubação nitrogenada e fosfatada, comum em muitos programas de recomendação, pode levar à negligência da reposição adequada de potássio, resultando em redução gradual dos estoques dos íons potássio do solo. Este resultado sugere que o manejo convencional adotado pode estar atuando no limite da exportação de nutrientes, sem promover a recuperação ou a manutenção da capacidade de troca catiônica relacionada ao K^+ , tornando o sistema dependente de aplicações anuais e vulnerável à queda de produtividade em caso de falha na adubação.

Os teores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) foram muito mais elevados no solo predominantemente orgânico do que no solo convencional. Esse padrão demonstra que o solo predominantemente orgânico possui maior saturação por bases e melhor capacidade de troca de cátions (CTC), já que Ca^{2+} e Mg^{2+} são os principais responsáveis pela neutralização da acidez e pela estabilidade estrutural do solo. Estudos destacam que a presença desses cátions melhora a agregação, reduz alumínio tóxico e favorece o crescimento da planta.

No solo sob manejo predominantemente orgânico, o teor de íons cálcio foi de $14,1 \pm 1,5 \text{ cmolc dm}^{-3}$, um valor considerado alto e indicativo de boa disponibilidade desse nutriente. O cálcio desempenha funções estruturais essenciais na parede celular das plantas e atua como regulador fisiológico e da estrutura do solo. Nesse

sistema, a aplicação de resíduos orgânicos ricos em cálcio como esterco contribuem para a manutenção desses níveis adequados, promovendo não apenas a nutrição vegetal, mas também a estabilidade do solo e a neutralização da acidez.

Em contrapartida, no sistema convencional, o teor médio de íons cálcio foi de apenas $0,530 \pm 0,042 \text{ cmolc dm}^{-3}$, classificado como muito baixo, o que caracteriza uma condição de deficiência nutricional. Esse resultado sugere uma possível ausência ou insuficiência de práticas de calagem, comum em sistemas que priorizam adubações minerais de pronto efeito, sem a devida correção da acidez do solo.

A concentração de íons magnésio, também apresentou contrastes expressivos. No solo orgânico, o teor médio foi de $11,4 \pm 2,7 \text{ cmolc dm}^{-3}$, um nível elevado que assegura um aporte suficiente para os processos fotossintéticos e metabólicos. A manutenção de teores adequados de magnésio está frequentemente associada ao uso de matéria orgânica diversificada e a corretivos que contenham esse elemento, como o calcário dolomítico.

Já no solo convencional, o valor observado foi de $0,141 \pm 0,041 \text{ cmolc dm}^{-3}$, extremamente baixo e indicativo de grave deficiência. Solos com teores tão reduzidos de Mg^{2+} podem induzir limitações ao desenvolvimento e à produtividade das culturas. Essa deficiência pode ser agravada em solos ácidos, com alta lixiviação ou com desequilíbrios provocados por adubações potássicas excessivas, que contrastam com a absorção de magnésio.

4.4. Determinação de Alumínio

A determinação de íons alumínio trocável revelou diferenças marcantes entre os sistemas: no solo predominantemente orgânico o Al^{3+} foi inferior ao limite de detecção ($< L.D.$), enquanto no solo convencional o Al^{3+} atingiu valor notável, como pode-se observar na Tabela 4.

A soma $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ é indicadora de acidez potencial, confirmando maior acidez trocável no solo convencional.

Tabela 4. Determinação de íons alumínio

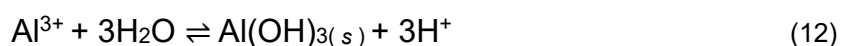
ANÁLISE	SOLO PREDOMINANTEMENTE ORGÂNICO	SOLO CONVENCIONAL
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00*	1,74 ± 0,08
H ⁺ +Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,23 ± 0,11	2,32 ± 0,07

Fonte: Autora.

* < L.D.

O valor abaixo do limite de detecção de Al³⁺ no solo predominantemente orgânico é um indicativo de qualidade química. O íon alumínio, em sua forma trocável, é um elemento fitotóxico que inibe o alongamento e a ramificação do sistema radicular, comprometendo a absorção de água e nutrientes, especialmente íons fosfato, através da formação de precipitados ¹⁵. A redução a níveis não detectáveis, como observado, sugere um solo livre desta toxidez.

Esse resultado pode ser atribuído à matéria orgânica que atua por meio de dois mecanismos principais: complexação e mineralização. Na complexação, os grupos funcionais dos ácidos húmicos formam complexos estáveis com íons Al³⁺, neutralizando sua atividade tóxica na solução do solo, com o aumento do pH. Na mineralização da matéria orgânica ocorre a liberação de ânions orgânicos que consomem os íons H⁺, promovendo uma elevação moderada do pH, o que favorece a precipitação do alumínio em formas não-trocáveis, como o hidróxido de alumínio.



Em contrapartida, o valor considerável de íons Al³⁺ no solo convencional sinaliza uma condição de acidez ativa, como pode-se observar na equação 12. Este cenário é comum em solos submetidos ao manejo convencional, onde o uso contínuo de fertilizantes pode contribuir para a acidificação. E a remoção de nutrientes pelas culturas, sem a devida reposição de corretivos ou matéria orgânica mantém ou eleva os teores de alumínio trocável.

A presença elevada de Al^{3+} no solo convencional está associada ao baixo pH medido, situação que pode provocar toxicidade por íons alumínio nas raízes, inibir o crescimento das plantas e reduzir a disponibilidade de íons fosfato².

O solo convencional provavelmente requer correção por calagem para elevar o pH, reduzindo a quantidade dos íons Al^{3+} trocável e melhorando as condições para a disponibilidade de nutrientes. A quantidade de corretivo deve ser estimada a partir da acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) e da capacidade de troca de cátions, conforme a literatura afirma. Já o manejo predominantemente orgânico, com a utilização da cama de frango e incremento de matéria orgânica demonstra efeito protetor contra a toxidez por íons alumínio.

4.5. Determinação de Matéria Orgânica no solo

O teor de matéria orgânica (MO) obtido para o solo predominantemente orgânico foi maior do que o teor encontrado em solo convencional, como pode-se observar na Tabela 5.

Esses valores confirmam a maior estabilidade do solo e que o acúmulo de compostos orgânicos favorecem processos de aporte de nutrientes.

Tabela 5. Determinação de Matéria Orgânica no Solo

ANÁLISE	SOLO PREDOMINANTEMENTE ORGÂNICO	SOLO CONVENCIONAL
MO (%)	4,57 ± 0,54	1,36 ± 0,16

Fonte: Autora.

O teor mais elevado de MO no solo predominantemente orgânico pode ser atribuído a uma maior deposição de resíduos vegetais, além de condições ambientais favoráveis à estabilização do húmus (Tabela 5). A matéria orgânica desempenha papel essencial na agregação do solo, retenção de água, aumento da capacidade de troca

de cátions (CTC) e disponibilização gradual de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e enxofre¹⁶. Dessa forma, solos com maior conteúdo orgânico tendem a apresentar maior fertilidade natural e melhores condições físico-químicas para o desenvolvimento vegetal.

Por outro lado, o solo convencional apresentou teor significativamente menor de MO, coerente com ambientes de maior mineralização, menor aporte de nutrientes e maior exposição a práticas agrícolas intensivas.

A diferença entre os dois solos analisados também evidencia como a MO influencia os processos químicos do solo. Solos com baixos teores de matéria orgânica apresentam menor CTC e, consequentemente, menor capacidade de retenção de nutrientes, exigindo maior dependência de adubações e práticas de manejo para garantir a produtividade. Isso explica por que solos convencionais mesmo recebendo adubação mineral apresentam fertilidade limitada⁸.

4.6. Determinação de SB, CTC e V%

A Tabela 6 evidencia diferenças entre os solos predominantemente orgânico e convencional quanto às propriedades de fertilidade química. O solo orgânico apresentou valores muito superiores de Soma de Bases trocáveis (SB), enquanto o solo convencional apresentou um valor significativamente menor.

Tabela 6. Valores de SB, CTC e V%.

ANÁLISE	SOLO PREDOMINANTEMENTE ORGÂNICO	SOLO CONVENCIONAL
Soma de Bases trocáveis ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	$26,4 \pm 4,4$	$0,69 \pm 0,09$
Capacidade de Troca de Cátions ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	$27,6 \pm 4,3$	$3,01 \pm 0,02$
Saturação por Bases (%)	$95,4 \pm 1,1$	$22,9 \pm 2,9$

Fonte: Autora

Esse comportamento reflete os resultados anteriores da concentração dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , que foram maiores no solo predominantemente orgânico devido ao aporte contínuo de matéria orgânica e fertilizantes, que fornecem cátions básicos e aumentam a absorção de nutrientes⁶.

A SB elevada é essencial por representar a quantidade de nutrientes disponíveis na solução do solo, que estão envolvidos na nutrição vegetal e no ajuste da acidez.

A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) também foi muito maior no solo predominantemente orgânico, em comparação com o solo convencional. A CTC elevada está associada ao maior teor de matéria orgânica (MO), que possui inúmeros sítios de cargas negativas capazes de reter cátions nutritivos como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e micronutrientes.

Esse aumento da CTC reduz perdas por lixiviação e aumenta a eficiência nutricional das plantas. Já no solo convencional, a baixa CTC pode estar relacionada

ao baixo teor de matéria orgânica e à predominância de minerais de carga permanente baixa, como ocorre em solos típicos do Mato Grosso do Sul.

A Saturação por Bases (V%) reforça essa diferenciação: o solo predominantemente orgânico apresentou 95,4%, enquanto no solo convencional o valor foi de apenas 22,9%. Portanto, indicando que o solo predominantemente orgânico é mais fértil, tem menor acidez ativa e potencial, além de ter maior disponibilidade de bases essenciais. Por outro lado, o valor reduzido de V% no solo convencional é compatível com o pH mais ácido e com os maiores teores de íons Al^{3+} observados anteriormente, demonstrando um ambiente quimicamente menos favorável para o desenvolvimento da planta.

Valores tão contrastantes evidenciam que, mesmo quando o solo convencional recebe fertilizantes minerais como NPK, a baixa MO e a acidez elevada limitam a retenção e o aproveitamento dos nutrientes aplicados, levando a perdas e menor eficiência produtiva.

4.7. Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) indicou diferenças significativas entre os sistemas de manejo predominantemente orgânico e convencional para todas as variáveis químicas avaliadas no solo. Os valores de p observados para cada parâmetro demonstram que o tipo de manejo exerce influência sobre as propriedades químicas, mesmo considerando o número reduzido de repetições experimentais.

Os parâmetros de acidez ativa apresentaram diferenças estatísticas claras entre os sistemas. Tanto o pH em CaCl_2 ($F = 40,41$; $p = 0,0239$) quanto o pH em água ($F = 40,54$; $p = 0,0238$) foram significativamente superiores no sistema predominantemente orgânico, refletindo uma menor acidez e sugerindo maior tamponamento químico do solo sob esse manejo. De forma complementar, a acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) também diferiu entre tratamentos ($F = 138,5$; $p = 0,0071$), indicando menor acidez trocável no solo predominantemente orgânico.

Os macronutrientes e elementos do complexo sortivo também apresentaram diferenças marcantes. O fósforo disponível (P) exibiu diferença considerável entre os sistemas ($F = 1.482.213$; $p = 6,75 \times 10^{-7}$), com valores substancialmente superiores no solo predominantemente orgânico. Potássio (K) mostrou diferença significativa ($F = 18,82$; $p = 0,0493$), enquanto cálcio e magnésio apresentaram contrastes ainda mais pronunciados. O teor de Ca ($F = 161,5$; $p = 0,0061$) e Mg ($F = 35,74$; $p = 0,0269$) foi amplamente superior no sistema predominantemente orgânico, refletindo maior saturação por bases e maior contribuição de cátions trocáveis. O alumínio trocável (Al) mostrou diferença altamente significativa ($F = 841$; $p = 0,0012$), com concentrações muito menores no sistema predominantemente orgânico, coerente com seus maiores valores de pH e maior teor de bases.

Parâmetros da fertilidade do solo também apresentaram diferenças consistentes. Os parâmetros SB, T e V% indicam maior retenção de nutrientes associados a menor acidez devido Al. A soma de bases (SB), a capacidade de troca (T) e a saturação por bases (V%) foram significativamente maiores no solo predominantemente orgânico (SB: $F = 66,6$; $p = 0,0147$; T: $F = 64,2$; $p = 0,0152$; V: $F = 1125$; $p = 0,00088$). Esses resultados reforçam o efeito positivo do manejo predominantemente orgânico na melhoria da fertilidade química e na redução da

acidez potencial, promovendo maior disponibilidade de nutrientes essenciais. Além disso, o teor de matéria orgânica do solo (MOS) diferiu significativamente entre os tratamentos ($F = 64,27$; $p = 0,0152$), indicando maior acúmulo de carbono no sistema predominantemente orgânico, o que também contribui para a melhoria da CTC e da retenção de nutrientes.

Em conjunto, os resultados demonstram que o sistema predominantemente orgânico promove melhorias substanciais na química do solo, com redução da acidez, aumento da disponibilidade de nutrientes e maior saturação por bases. Apesar do número limitado de observações, a magnitude dos efeitos e a consistência do padrão observado conferem robustez às conclusões, sugerindo que a adoção do manejo predominantemente orgânico está diretamente associada à melhoria da qualidade química do solo.

4.8. Análise de componentes principais

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada às variáveis químicas das amostras de solo com o objetivo de identificar padrões multivariados associados aos sistemas de manejo predominantemente orgânico e convencional. A PCA, apresentada na Figura 4, resultou em quatro componentes principais, mas apenas os dois primeiros foram considerados para interpretação gráfica, uma vez que concentram praticamente toda a variabilidade distinguível entre os tratamentos. Observou-se que o PC1 explicou a separação completa entre os solos, com valores negativos associados às amostras convencionais e positivos associados às amostras orgânicas, indicando a influência do manejo sobre o conjunto de atributos químicos.

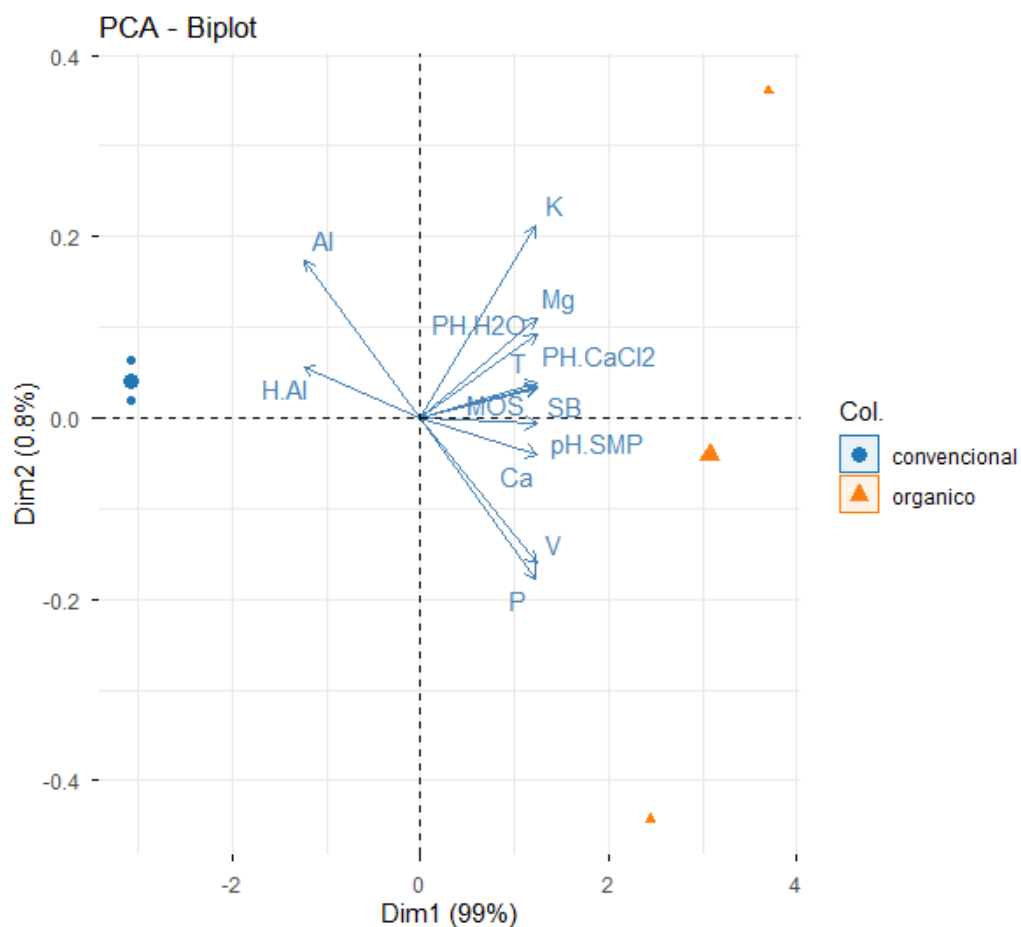


Figura 4. Análise de componentes principais das amostras de solos de manejo convencional e predominantemente orgânico. PC1 (99% de variância explicada). PC2 (0,8% de variância explicada).

Os *scores* obtidos evidenciaram que as duas amostras convencionais apresentaram valores muito semelhantes de PC1 (-3,55), refletindo um perfil químico homogêneo e caracterizado por maior acidez, maiores teores de Al^{3+} trocável e menores concentrações de nutrientes básicos, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Em contraste, as amostras do manejo predominantemente orgânico apresentaram *scores* altamente positivos (2,83 e 4,28), indicando um padrão químico distinto, marcado por maior fertilidade, elevada saturação por bases (V%), maior soma de bases (SB), maior conteúdo de matéria orgânica (MOS), além de valores superiores de Ca, Mg e P disponível.

A forte oposição entre os dois sistemas de cultura ao longo do PC1 confirma que a maior parte da variabilidade nos atributos químicos do solo é explicada pelo efeito do manejo. Assim, o PC1 pode ser interpretado como um eixo de fertilidade vs. acidez, no qual os solos predominantemente orgânicos apresentam características químicas mais favoráveis. Esse resultado é coerente com os valores individuais das variáveis analisadas, nos quais o solo predominantemente orgânico apresentou maiores teores de nutrientes essenciais e menor acidez potencial, enquanto o solo convencional concentrou atributos relacionados à degradação química, como altos níveis de H^+Al e Al^{3+} trocável.

O PC2 apresentou menor importância relativa, sendo responsável apenas por pequenas variações entre as amostras dentro de cada sistema, sem alterar o padrão geral de separação entre os manejos. A proximidade das amostras dentro de cada grupo indica que a diferenciação entre sistemas é maior do que a variabilidade interna dentro de cada manejo.

Em síntese, a PCA demonstra que os parâmetros químicos medidos nas amostras analisadas são suficientemente sensíveis para discriminar de forma clara e consistente os solos sob diferentes estratégias de manejo. Os resultados reforçam que o manejo predominantemente orgânico promove condições químicas mais equilibradas, com maior disponibilidade de bases e nutrientes, enquanto o manejo convencional está associado a maior acidez e menor fertilidade geral. Nas condições experimentais deste trabalho, essa separação multivariada evidencia que práticas de

manejo desempenharam papel determinante na qualidade química do solo, mesmo em pequena escala amostral.

4.9. Análise Hierárquica de Agrupamento

A Análise Hierárquica de Agrupamento (HCA) foi aplicada às variáveis químicas do solo com o objetivo de identificar similaridades multivariadas entre as amostras, como mostrado na Figura 5. A matriz de distâncias euclidianas foi calculada a partir dos dados padronizados (z-score), e o agrupamento foi realizado pelo método de Ward (Ward.D2), considerado adequado para dados químicos devido à sua capacidade de minimizar a variância dentro dos grupos.

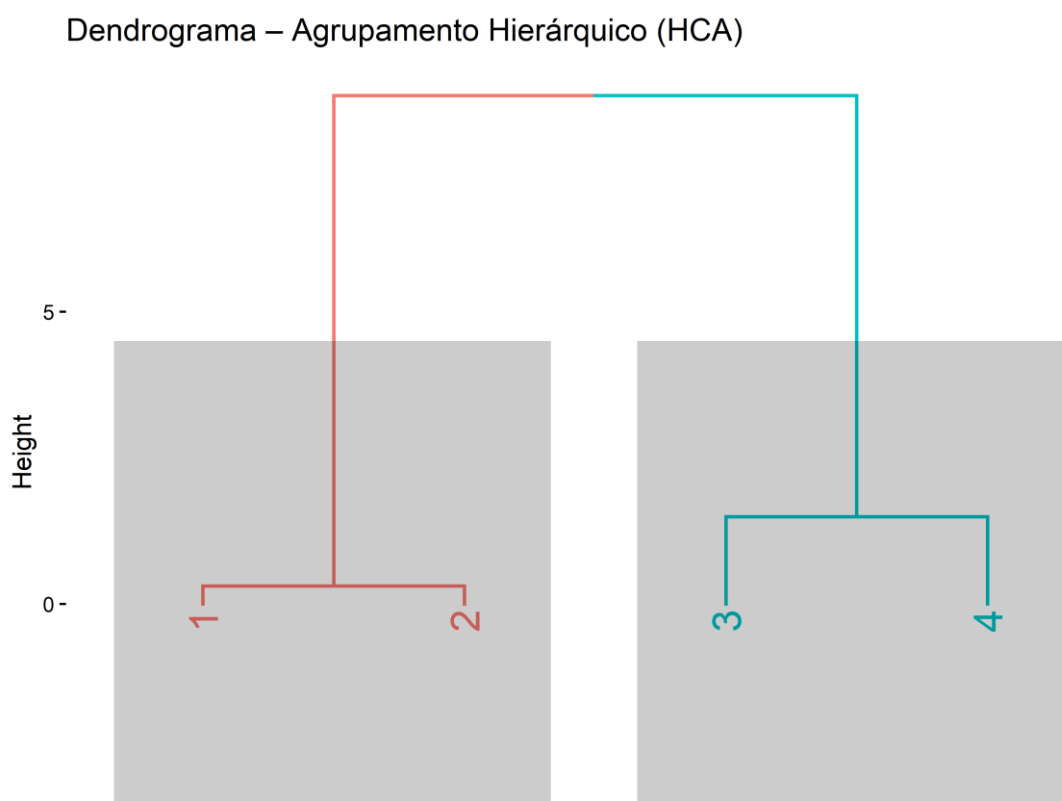


Figura 5. Análise Hierárquica de Agrupamento (HCA) das amostras de solos de manejo convencional (1-2) e manejo predominantemente orgânico (3-4).

O dendrograma resultante evidenciou a formação de dois grupos claramente distintos, correspondentes aos sistemas de manejo predominantemente orgânico e convencional. As amostras orgânicas agruparam-se no mesmo ramo, demonstrando elevada similaridade entre si e indicando um padrão químico homogêneo caracterizado por elevados teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , P disponível, maior soma de bases (SB), maior saturação por bases (V%) e maiores níveis de matéria orgânica do solo (MOS). Esses atributos caracterizam um solo de maior fertilidade, apresentando elevada capacidade de troca de cátions e melhor eficiência nos processos de tamponamento. No solo, os processos de tamponamento correspondem à capacidade do sistema do solo de neutralizar variações de pH por meio de reações envolvendo matéria orgânica, colóides minerais e cátions trocáveis. Solos com maior CTC, maior teor de bases e maior conteúdo predominantemente orgânico apresentam maior eficiência nesse tamponamento químico.

Em contraste, as amostras do manejo convencional posicionaram-se em um grupo separado, demonstrando proximidade entre si, mas marcada distância em relação ao grupo predominantemente orgânico. Esse agrupamento foi influenciado por características como maior acidez ativa e potencial (H+Al), presença de Al^{3+} trocável e menores teores de nutrientes básicos, resultando em solos com menor saturação por bases e menor qualidade química geral.

A separação nítida dos dois grupos, mesmo com um número reduzido de amostras, confirma que os parâmetros químicos avaliados são eficientes para discriminar estes solos quanto ao tipo de manejo. Além disso, a coerência entre os resultados da HCA e da PCA indica que ambas as técnicas multivariadas capturam o mesmo padrão estrutural: solos predominantemente orgânicos diferenciam-se amplamente dos solos convencionais devido ao aumento da fertilidade e redução da acidez toxicologicamente ativa.

A HCA, portanto, reforça que o manejo predominantemente orgânico promove um perfil químico distinto daquele observado sob manejo convencional, evidenciando melhorias consistentes na qualidade do solo e nos atributos de fertilidade.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que o manejo predominantemente orgânico promove melhorias significativas nas propriedades químicas do solo quando comparado ao manejo convencional, demonstrando impactos positivos na fertilidade, na redução da acidez e na qualidade geral do solo.

O solo sob manejo predominantemente orgânico apresentou valores de pH mais elevados, com menor acidez ativa e potencial, além da ausência de alumínio trocável detectável, fator crucial para evitar toxidez radicular e favorecer o desenvolvimento das plantas. Em contrapartida, o solo convencional evidenciou acidez elevada, presença significativa de Al^{3+} e baixa saturação por bases, condicionantes que limitam a disponibilidade de nutrientes e exigem correções frequentes, como a calagem.

Quanto à fertilidade, os teores de macronutrientes essenciais: fósforo, potássio, cálcio e magnésio, foram superiores no sistema predominantemente orgânico. A concentração de fósforo disponível, por exemplo, foi muito maior no solo predominantemente orgânico, teores de cálcio e magnésio também foram mais elevados, refletindo maior capacidade de troca catiônica (CTC) e melhor estruturação do solo. Já no sistema convencional, a baixa CTC e o reduzido teor de matéria orgânica limitaram a retenção e a eficiência no uso dos nutrientes, mesmo com a aplicação de fertilizantes minerais.

A análise de matéria orgânica reforçou a distinção entre os sistemas: o solo predominantemente orgânico apresentou teores cerca de três vezes superiores, o que contribui para maior agregação, retenção hídrica, tamponamento de pH e ciclagem de nutrientes. Esse acúmulo de carbono predominantemente orgânico está diretamente associado às práticas de adubação orgânica e à menor perturbação do solo, comuns nesse sistema de manejo.

As análises estatísticas: Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise Hierárquica de Agrupamento (HCA) confirmaram a clara separação entre os perfis químicos dos dois sistemas. A PCA mostrou que 99% da variabilidade é explicada pelo tipo de manejo, com o solo predominantemente orgânico associado a eixos de maior fertilidade e saturação por bases, enquanto o convencional se relaciona com acidez e

presença de alumínio tóxico. A HCA, por sua vez, agrupou as amostras de forma consistente, destacando a homogeneidade dentro de cada sistema e a marcante não similaridade entre eles.

Portanto, este estudo demonstra que a adoção do manejo predominantemente orgânico, baseado na incorporação contínua de matéria orgânica, na diversificação de insumos e na menor dependência de correções químicas, resulta em solos com maior capacidade de autorregulação, fertilidade natural sustentada e resistência à degradação química. Os resultados reforçam a viabilidade técnica e agronômica desse sistema, não apenas como alternativa ao modelo convencional, mas como estratégia promissora para a construção de solos mais saudáveis, resilientes e produtivos a longo prazo.

Logo, recomenda-se a ampliação de práticas orgânicas de manejo, associadas à monitorização contínua dos atributos do solo, visando à sustentabilidade dos agroecossistemas e à segurança alimentar, sem comprometer os recursos naturais.

Referências

1. **ABREU, L. S. de. Agricultura orgânica.** Embrapa Meio Ambiente – Agência de Informação Tecnológica. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/politicas/agroecologia/agricultura-organica>. Acesso em: 25 nov. 2025.
2. RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes.** Piracicaba: IPNI, 2011.
3. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017.
4. FACHIN, V.; ANDRADE, A. T. **Nutrição mineral e diagnose do estado nutricional das hortaliças.** Lavras: UFLA/FAEDE, 2004.
5. EMBRAPA. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões.** Campinas, 2010.
6. BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
7. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.
8. NOVAIS, R. F. *et al.* **Fertilidade do Solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.
9. ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. (Org.). **Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo em Sistemas Conservacionistas: Modelagem e Indicadores.** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 349 p.
10. ROSA, A. H.; ROCHA, J. C. **Química Ambiental.** São Paulo: Editora Unesp, 2003. 234 p.
11. CQFS-RS/SC – COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para RS e SC.** 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016.
12. KASSAMBARA, A. **Principal component analysis in R: prcomp vs princomp.** STHDA – Statistical Tools for High-Throughput Data Analysis, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.sthda.com/english/articles/31-principal-component-methods-in-r-practical-guide/118-principal-component-analysis-in-r-prcomp-vs-princomp/>>. Acesso em: 27 nov. 2025.

13. THE CRAN PROJECT. **Getting started with hclust1d**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/hclust1d/vignettes/getting-started.html>>. Acesso em: 27 nov. 2025.
14. WICKHAM, H. **ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>>. Acesso em: 27 nov. 2025.
15. FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. **Micronutrientes na agricultura brasileira**. Jaboticabal: FUNEP, 2008.
16. SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. **Matéria orgânica do solo**. In: NOVAIS, R. F. et al. (Org.). Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. p. 275–374.
17. ALENCAR-VILLANOVA, Donald; VIEIRA, Carlos; MORENO, Camila. **factoextra: R tools for multivariate data analyses and data visualization**. Disponível em: <https://rpkgs.datanovia.com/factoextra/index.html>>. Acesso em: 27 nov. 2025.
18. MALAVOLTA, E. **Manual de Química Agrícola: Adubos e Adubação**. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.
19. BOTEGA, Jéssica Luiza. **Compostagem e caracterização físico-química de substrato de cama de aviário: estudo de caso**. 2019. 90f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019