

QUALIDADE BIOLÓGICA, MICROBIOLÓGICA E DO CARBONO DO SOLO SOB PASTEJO ROTACIONADO COM APLICAÇÃO DE DEJETO LÍQUIDO DE SUÍNOS

¹Alieze Nascimento da Silva, ²Eveline Ferreira Soares, ³Mariza Tereza Souza do Prado, ⁴Rodrigo Ferreira Da Silva, ⁴Vanderlei Rodrigues Da Silva, ⁴Claudir José Basso, ⁵Cícero Ortigara

¹ Doutora em Agronomia, Docente da Universidade de Cruz Alta, UNICRUZ, *Campus Cruz Alta*, Brasil

mail: alieze.agro@gmail.com

²Doutoranda em Fitotecnia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, *Porto Alegre*, Brasil

³Graduanda em Agronomia pelo Instituto Federal Farroupilha, *Campus Panambi*, RS, Brasil

⁴Docente na Universidade Federal de Santa Maria, *Campus Frederico Westphalen*, Brasil

⁵Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, *Porto Alegre*, Brasil

Recebido em: 15/01/2026 – Aprovado em: 02/03/2026 – Publicado em: 30/03/2026

DOI: 10.18677/EnciBio_2026A10

RESUMO

Os atributos biológicos e microbiológicos do solo são reconhecidos como indicadores sensíveis às mudanças de manejo e exercem papel central na dinâmica do carbono e na qualidade do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos do pastejo rotacionado e das aplicações sucessivas de dejetos líquidos de suínos (DLS) sobre indicadores biológicos, microbiológicos e do carbono do solo em um Cambissolo Háplico no sul do Brasil. Foram avaliados quatro sistemas de uso do solo: mata nativa (referência), pastagem sob pastejo rotacionado por cinco anos (Past 5), pastagem sob pastejo rotacionado por cinco anos com aplicação de DLS via fertirrigação (Past 5 IR) e pastagem sob pastejo rotacionado por quinze anos (Past 15). O carbono orgânico total (COT) foi determinado até 0,30 m de profundidade, enquanto o carbono da biomassa microbiana (BMS-C), a respiração basal do solo (RBS), o quociente metabólico (qCO_2), o quociente microbiano ($qMic$) e os índices da fauna edáfica foram avaliados na camada superficial. A mata nativa apresentou os maiores teores de COT e BMS-C, refletindo maior estabilidade ecológica. Entre os sistemas manejados, o maior tempo de adoção do pastejo e as aplicações sucessivas de DLS favoreceram o aumento da biomassa microbiana e da eficiência de incorporação do carbono, especialmente no sistema Past 15. Entretanto, o incremento da atividade microbiana não resultou necessariamente em maior acúmulo de COT, indicando a ocorrência de efeito *priming*. A fauna edáfica apresentou maior abundância nos sistemas sob pastejo, enquanto a diversidade foi superior na mata nativa e no sistema fertirrigado. Os resultados evidenciam que a qualidade do solo em pastagens é fortemente condicionada pelo tempo de manejo, pela intensidade de uso e pela dinâmica biológica, reforçando a importância de avaliações integradas e de longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa microbiana; carbono orgânico do solo; fauna edáfica.

SOIL BIOLOGICAL, MICROBIOLOGICAL, AND CARBON QUALITY UNDER ROTATIONAL GRAZING WITH SWINE SLURRY APPLICATION

ABSTRACT

Soil biological and microbiological attributes are recognized as sensitive indicators of management changes and play a central role in carbon dynamics and soil quality. This study aimed to evaluate the effects of rotational grazing and successive applications of swine slurry (SS) on soil biological, microbiological, and carbon-related indicators in a Haplic Cambisol in southern Brazil. Four land-use systems were evaluated: native forest (reference), pasture under rotational grazing for five years (Past 5), pasture under rotational grazing for five years with swine slurry application via fertigation (Past 5 IR), and pasture under rotational grazing for fifteen years (Past 15). Soil organic carbon (SOC) was determined to a depth of 0.30 m, while microbial biomass carbon (MBC), basal soil respiration (BSR), metabolic quotient (qCO_2), microbial quotient ($qMic$), and soil fauna indices were assessed in the surface layer. Native forest exhibited the highest SOC and MBC contents, reflecting greater ecological stability. Among managed systems, longer grazing duration and successive swine slurry applications increased microbial biomass and carbon incorporation efficiency, particularly in Past 15. However, increased microbial activity did not necessarily result in greater SOC accumulation, indicating the occurrence of priming effects. Soil fauna showed higher abundance in grazed systems, whereas diversity was greater in the native forest and in the fertirrigated pasture. These results demonstrate that soil quality in pasture systems is strongly conditioned by management duration, use intensity, and biological dynamics, highlighting the importance of integrated and long-term assessments.

KEYWORDS: microbial biomass; soil organic carbon; soil fauna.

INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural finito e essencial à produtividade agrícola e à provisão de serviços ecossistêmicos, devendo ser manejado de forma a preservar suas funções físicas, químicas e biológicas (NICOLOSO *et al.*, 2024; CHERUBIN *et al.*, 2025). Nesse contexto, os indicadores de qualidade do solo (QS) são fundamentais para avaliar, de forma integrada, os efeitos do manejo sobre o funcionamento do sistema edáfico, tema que tem ganhado destaque frente à intensificação produtiva e à demanda por uso sustentável do solo (FERON *et al.*, 2024; CHERUBIN *et al.*, 2025).

A QS baseia-se na mensuração de atributos capazes de expressar a capacidade do solo em sustentar a produtividade vegetal, regular fluxos de água e nutrientes, manter a biodiversidade e mitigar impactos ambientais, podendo ser avaliada por indicadores isolados ou por índices integrados (CHERUBIN *et al.*, 2021; CHERUBIN *et al.*, 2025).

Em sistemas de pastagem, a degradação do solo está frequentemente associada ao manejo inadequado e à elevada lotação animal, que afetam negativamente a estrutura do solo. Por outro lado, melhorias na QS permitem a intensificação sustentável das pastagens, embora o pisoteio animal, especialmente em condições de elevada umidade, possa aumentar a densidade e reduzir a porosidade do solo (CHERUBIN *et al.*, 2016).

A aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS) em pastagens tem sido amplamente estudada como alternativa aos fertilizantes minerais, devido ao seu

potencial de fornecimento de nutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio (NICOLOSO *et al.*, 2024; LEMOS *et al.*, 2025). Quando tecnicamente adequada, a adição de DLS pode contribuir para a melhoria da QS, embora o uso contínuo de resíduos orgânicos promova alterações marcantes nos componentes biológicos do solo, particularmente na biomassa e na atividade microbiana (CHERUBIN *et al.*, 2015; LOURENZI *et al.*, 2021; YOST *et al.*, 2022; NICOLOSO *et al.*, 2024).

Os atributos biológicos, microbiológicos e o carbono orgânico do solo são reconhecidos como indicadores altamente sensíveis às mudanças de manejo, respondendo mais rapidamente às aplicações de resíduos orgânicos do que os atributos físicos tradicionais (SILVA *et al.*, 2015; GÓRSKA *et al.*, 2022; BENÍCIO, 2025). O acúmulo de carbono orgânico, associado à biomassa e à diversidade microbiana, reflete melhorias na QS e influencia processos ambientais relevantes, como a mitigação de gases de efeito estufa e a redução da lixiviação de nutrientes (SILVA *et al.*, 2021; LOURENZI *et al.*, 2021; FERON *et al.*, 2024; LUZ *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2024).

Apesar dos avanços, ainda são limitados os estudos de longo prazo que avaliam de forma integrada os efeitos de aplicações sucessivas de DLS em pastagens perenes sob pastejo rotacionado, sendo que respostas mais consistentes da QS tendem a emergir apenas após longos períodos de manejo contínuo (CHERUBIN *et al.*, 2021; CICHELERO *et al.*, 2023). Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar alterações nos indicadores físicos, biológicos e microbiológicos da qualidade do solo em um Cambissolo Háplico sob pastejo rotacionado e aplicações sucessivas de DLS.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma propriedade rural localizada no município de Taquaruçu do Sul, região do Médio Alto Uruguai, estado do Rio Grande do Sul, Brasil, situada nas coordenadas geográficas 27°25'24" de latitude sul e 53°26'50" de longitude oeste, a uma altitude média de 480 m. O clima da região é classificado como subtropical úmido do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado por temperatura média anual de aproximadamente 19 °C e precipitação média anual variando entre 1.800 e 2.000 mm, distribuída de forma relativamente uniforme ao longo do ano (ALVARES *et al.*, 2013). O solo da área experimental foi classificado como Cambissolo Háplico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018).

Foram selecionadas quatro áreas consideradas homogêneas quanto ao solo e ao histórico de manejo: (i) Past 5 – área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras há cinco anos; (ii) Past 5 IR – área sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras há cinco anos, com aplicação de DLS via sistema de fertirrigação; (iii) Past 15 – área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras há quinze anos; e (iv) Mata nativa – área adjacente, utilizada como sistema de referência. A taxa de lotação animal adotada foi de 14 unidades animais por hectare (UA ha⁻¹) durante o período de verão e 8 UA ha⁻¹ durante o inverno, de acordo com o potencial produtivo da pastagem.

A pastagem de verão foi composta por tifton 85 (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.), enquanto, no período de inverno, foram utilizadas aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) e azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.), implantadas por semente sobre a pastagem perene. A implantação inicial da pastagem de tifton 85 foi realizada manualmente, com preparo do solo envolvendo duas

subsolagens utilizando escarificador de cinco hastes, espaçadas em 0,45 m, até a profundidade média de 0,25 m.

Nas áreas Past 5 e Past 15, o DLS foi aplicado superficialmente por meio de esterqueira autopropelida, enquanto na área Past 5 IR a aplicação ocorreu via sistema de fertirrigação por aspersão convencional fixo. Em todas as áreas manejadas, a taxa anual de aplicação foi de $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No sistema de fertirrigação, o DLS foi previamente diluído em água, conforme as exigências nutricionais e hídricas da pastagem, buscando evitar excessos e perdas por escoamento superficial ou lixiviação (LOURENZI *et al.*, 2021).

A área de Mata nativa foi considerada como tratamento controle e corresponde a um fragmento de Floresta Estacional Decidual, conforme classificação fitoecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, sem evidências de interferência antrópica recente (IBGE, 2012).

As amostras de solo indeformadas foram coletadas nas camadas de 0,00–0,05; 0,05–0,10; 0,10–0,20; e 0,20–0,30 m, utilizando anéis volumétricos com altura média de 0,05 m e diâmetro médio de 0,048 m, inseridos manualmente no solo. Foram realizadas duas amostragens por camada em cada parcela, com quatro repetições por tratamento, totalizando 128 amostras indeformadas.

TABELA 1. Valores médios referentes à análise de densidade de partícula realizada em cada camada de cada tratamento

| Camada (m) | Mata | Past 5 | Past 5 IR | Past 15 |
|------------|------|--------|-----------|---------|
| 0,00-0,05 | 2,38 | 2,71 | 2,71 | 2,68 |
| 0,05-0,10 | 2,51 | 2,76 | 2,76 | 2,75 |
| 0,10-0,20 | 2,61 | 2,78 | 2,75 | 2,76 |
| 0,20-0,30 | 2,63 | 2,77 | 2,75 | 2,75 |

*Onde: Past 5 = área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos 5 anos; Past 5 IR = área fertirrigada manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos 5 anos; Past 15 = área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos quinze anos; e Mata nativa

Nas mesmas camadas foram coletadas amostras deformadas para a determinação do carbono orgânico total do solo (COT), quantificado pelo método de oxidação úmida com dicromato de potássio em meio ácido, conforme Yeomans e Bremner (1988). As análises microbiológicas foram realizadas em amostras deformadas da camada de 0,00–0,10 m, representativa da maior atividade biológica e sensibilidade ao manejo, com processamento imediato para minimizar alterações na atividade microbiana (ALEF; NANNIPIERI, 1995).

Foram avaliados o carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS), a respiração basal do solo (RBS), o quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), o COT e o quociente microbiano ($q\text{Mic}$). O CBMS foi determinado pelo método da fumigação-extração (VANCE *et al.*, 1987), enquanto a RBS foi quantificada por respirometria, segundo método modificado de Jenkinson e Powlson (1976). O $q\text{CO}_2$ foi calculado pela razão entre RBS e CBMS, como indicador de eficiência metabólica e estresse microbiano (LIPTZIN *et al.*, 2022; YOST *et al.*, 2022), e o $q\text{Mic}$ pela relação entre CBMS e COT, refletindo a proporção de carbono imobilizado na biomassa microbiana (SILVA *et al.*, 2021; SEMENOV *et al.*, 2025).

A fauna edáfica foi avaliada pelo método PROVID, com armadilhas de queda mantidas por sete dias, conforme Manfredini *et al.* (2023). Os organismos foram quantificados e identificados até classe ou ordem, permitindo a determinação da abundância, riqueza taxonômica e dos índices de Margalef, Simpson, Shannon-Wiener e Pielou, conforme Baretta *et al.* (2019) e Semenov *et al.*, (2025).

Os dados foram submetidos à análise de variância (teste F) e, quando significativos, comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa Genes (CRUZ, 2006). As relações entre os atributos do solo foram representadas graficamente no SigmaPlot® versão 16.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

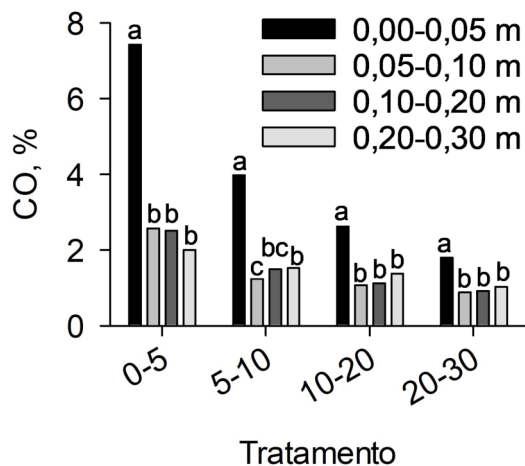
Carbono orgânico total do solo

O carbono orgânico total do solo (COT) apresentou valores significativamente superiores no sistema Mata em todas as camadas avaliadas, com teor de 7,42% na camada de 0,00–0,05 m, decrescendo progressivamente até 1,80% na camada de 0,20–0,30 m (Figura 1). Esse padrão vertical, caracterizado por forte estratificação do carbono nas camadas superficiais, é típico de ecossistemas florestais não perturbados, nos quais o aporte contínuo de resíduos vegetais, associado à ausência de revolvimento do solo, favorece o acúmulo e a proteção física e bioquímica da matéria orgânica ao longo do perfil (SILVA *et al.*, 2021; CHERUBIN *et al.*, 2021; CHERUBIN *et al.*, 2025).

Nos sistemas sob pastejo, os teores de COT foram significativamente inferiores aos observados na Mata em todas as profundidades (Figura 1), variando entre 2,56% na camada superficial do sistema Past 5 e 0,88% na camada de 0,20–0,30 m no sistema Past 15. Esses resultados refletem a maior intensidade de uso do solo sob pastejo, a remoção contínua de biomassa aérea pelos animais e a maior exposição da matéria orgânica à decomposição microbiana, mesmo em sistemas sem revolvimento periódico do solo (LOURENZI *et al.*, 2021).

A análise da Figura 1 evidencia que as diferenças entre os sistemas sob pastejo foram mais restritas à camada de 0,05–0,10 m, na qual o sistema Past 15 apresentou maior teor de COT em comparação ao Past 5. Esse comportamento pode ser atribuído ao longo tempo de adoção do manejo sem revolvimento do solo, favorecendo maior contribuição radicular e alta estabilização do carbono em agregados, especialmente em subsuperfície (CHERUBIN *et al.*, 2021; BÜNEMANN *et al.*, 2023; LI *et al.*, 2024). Nas demais camadas avaliadas (0,10–0,20 e 0,20–0,30 m), não foram observadas diferenças significativas de COT entre os sistemas sob pastejo, indicando que o efeito do tempo de manejo e da aplicação de DLS sobre o acúmulo de carbono é limitado às camadas mais superficiais do solo.

FIGURA 1. Médias do carbono orgânico total do solo (COT) em diferentes sistemas de uso e camadas do solo. Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.



Fonte: Autores (2025)

Os menores teores de carbono orgânico total (COT) nos sistemas com aplicação de DLS corroboram estudos que não observam incremento, ou indicam redução do COT após aplicações sucessivas, em função do efeito priming (GROSS *et al.*, 2021; LIPTZIN *et al.*, 2022; YOST *et al.*, 2022; MORA-SALGUERO *et al.*, 2025). A adição de resíduos ricos em nitrogênio mineral e carbono lábil estimula a atividade microbiana e a mineralização do carbono nativo, especialmente quando há desbalanço entre nitrogênio e carbono disponível (YOST *et al.*, 2022).

A aplicação recorrente de DLS aumenta a disponibilidade de nitrogênio e compostos orgânicos facilmente assimiláveis, promovendo reorganização funcional da microbiota e podendo limitar o acúmulo de COT em sistemas de uso intensivo, mesmo com aporte orgânico contínuo (CICHELERO *et al.*, 2023; WU *et al.*, 2025; REN *et al.*, 2025). Embora revisões indiquem potencial de incremento do COT com esterco suíno, as respostas são altamente variáveis e dependem de fatores edafoclimáticos, método de aplicação e tempo de manejo (YOST *et al.*, 2022).

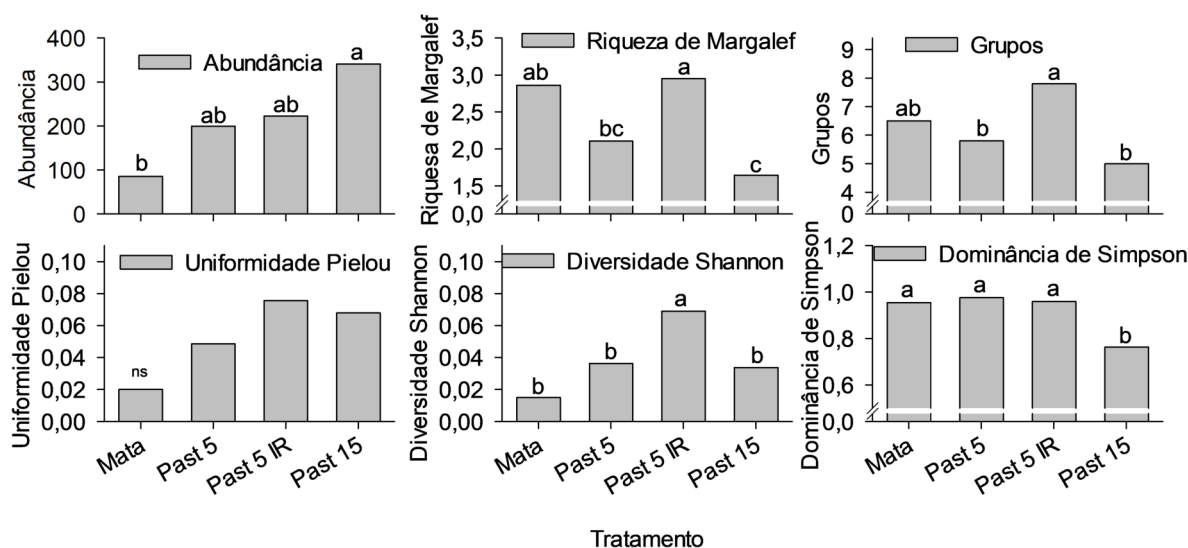
A maior concentração de COT na Mata reflete o equilíbrio entre elevado aporte de resíduos e menor intensidade de decomposição, típico de ecossistemas não perturbados, nos quais a diversidade de fontes orgânicas e a estabilidade microclimática favorecem a proteção do carbono no solo (GÓRSKA *et al.*, 2022). Assim, em pastagens sob pastejo rotacionado intensivo, o COT é governado pela interação entre intensidade de uso, entradas de carbono, estímulo microbiano e tempo de manejo, reforçando a necessidade de avaliações de longo prazo para a correta interpretação da qualidade do solo (CHERUBIN *et al.*, 2021; LOURENZI *et al.*, 2021; YOST *et al.*, 2022; LIPTZIN *et al.*, 2022; BENÍCIO, 2025).

Fauna edáfica

A abundância total da fauna edáfica foi significativamente superior no sistema Past 15, diferindo estatisticamente apenas da área de Mata (Figura 2). Os sistemas Past 5 e Past 5 IR apresentaram valores intermediários, não diferindo estatisticamente entre si. O menor valor de abundância foi observado na área de

Mata, refletindo a maior estabilidade ecológica desse sistema, no qual a menor disponibilidade de recursos lábeis tende a favorecer comunidades menos numerosas, porém mais equilibradas. Em contraste, o aumento da abundância nos sistemas sob pastejo, especialmente no Past 15, pode ser associado ao maior aporte de resíduos orgânicos e à aplicação contínua de DLS, que elevam a disponibilidade de alimento e favorecem o crescimento populacional de organismos edáficos.

FIGURA 2- Abundância (a), Riqueza de Margalef (b), total de grupos (c), Uniformidade de Pielou (d), Diversidade de Shannon (e) e dominância de Simpson (f), para os diferentes sistemas de uso do solo mata nativa pertencente à região fitoecológica da Floresta Estacional Decidual (Mata); área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos cinco anos sem fertirrigação (Past 5), com irrigação (Past 5 IR) e área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos quinze anos sem fertirrigação. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade



Fonte: Autores (2025)

A riqueza de Margalef e o número total de grupos da fauna edáfica responderam de forma distinta da abundância, evidenciando efeitos específicos dos sistemas de uso e manejo do solo. Os maiores valores desses indicadores foram observados nos sistemas Mata e Past 5 IR, associados, respectivamente, à maior estabilidade ecológica e à aplicação de DLS combinada à irrigação, que favoreceu maior umidade do solo e disponibilidade de recursos, criando condições microclimáticas propícias ao estabelecimento de maior diversidade faunística (NADJIRE *et al.*, 2025).

A maior diversidade no sistema Past 5 IR também está relacionada às alterações na estrutura e funcionalidade da microbiota induzidas pela adubação orgânica, que sustenta redes tróficas edáficas mais complexas (GÓRSKA *et al.*, 2022; BENÍCIO, 2025). O índice de uniformidade de Pielou não diferiu entre os

sistemas, indicando distribuição relativamente homogênea dos indivíduos entre os grupos taxonômicos.

O índice de diversidade de Shannon foi superior no sistema Past 5 IR, reforçando seu papel como bioindicador da estabilidade das comunidades edáficas, influenciado pela cobertura do solo e pelo maior aporte de resíduos orgânicos (SILVA *et al.*, 2021; CHERUBIN *et al.*, 2025; WU *et al.*, 2025). Em contraste, o índice de dominância de Simpson foi menor no sistema Past 15, indicando menor concentração de poucos grupos, apesar da maior abundância total, padrão associado ao manejo prolongado.

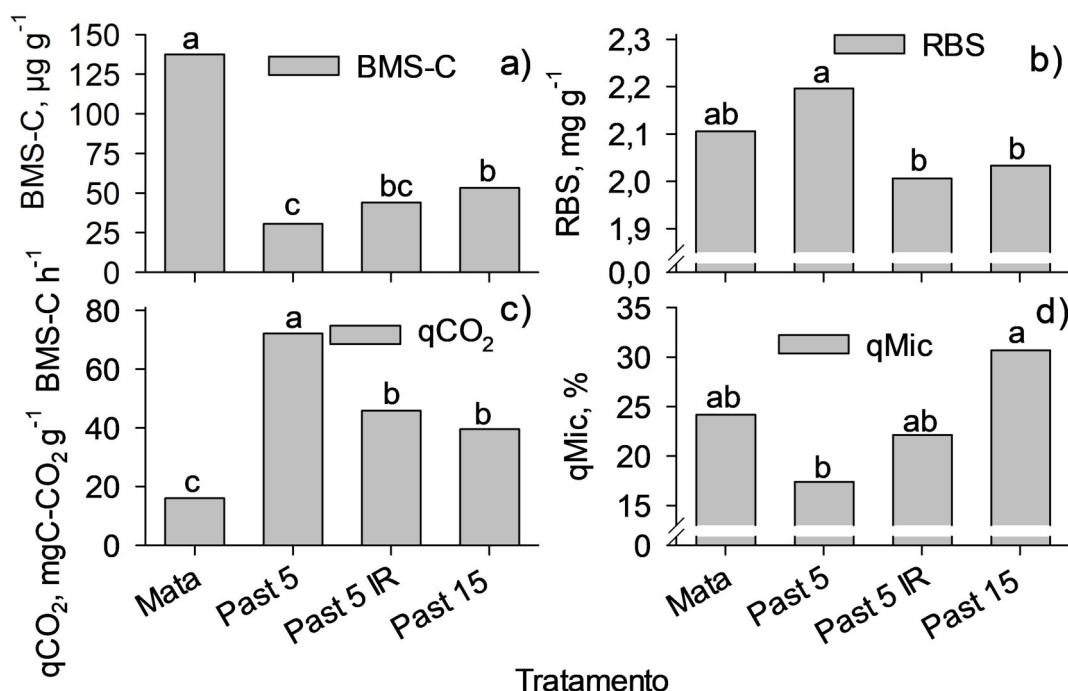
De modo geral, a aplicação recorrente de resíduos orgânicos intensificou a atividade microbiana e reorganizou a comunidade edáfica, aumentando a abundância da fauna, embora nem sempre com incremento proporcional da diversidade, sobretudo em ambientes sujeitos a distúrbios frequentes (SILVA *et al.*, 2015; CICHELERO *et al.*, 2023; SUI *et al.*, 2023; WU *et al.*, 2025). Esses resultados confirmam a fauna edáfica como importante bioindicadora da qualidade do solo, sensível às interações entre manejo, aporte orgânico e dinâmica microbiana.

Atributos microbiológicos do solo

O carbono da biomassa microbiana (BMS-C) foi significativamente influenciado pelos sistemas de manejo e pelas sucessivas aplicações de DLS (Figura 3). O sistema Mata apresentou os maiores valores de BMS-C, diferindo de todos os sistemas sob pastejo, o que reflete a maior estabilidade ecológica, a ausência de interferência antrópica e o aporte contínuo e diversificado de resíduos orgânicos. Esses fatores favorecem condições microclimáticas mais estáveis, alta diversidade de substratos e elevada proteção física do solo, promovendo intenso acúmulo e manutenção da biomassa microbiana, conforme amplamente relatado para áreas de vegetação nativa e sistemas menos perturbados (GÓRSKA *et al.*, 2022).

Esses atributos refletem a magnitude da biomassa microbiana, a intensidade da atividade respiratória, a eficiência metabólica dos microrganismos do solo e a proporção do carbono orgânico total imobilizada na biomassa microbiana, respectivamente, sendo indicadores sensíveis das alterações funcionais do solo induzidas pelo manejo e pelo tempo de uso das áreas.

FIGURA 3. Indicadores microbiológicos e bioquímicos da qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo. (a) Carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C, $\mu\text{g C g}^{-1}$ de solo); (b) respiração basal do solo (RBS, $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de solo); (c) quociente metabólico ($q\text{CO}_2$, $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de BMS-C h^{-1}); e (d) quociente microbiano ($q\text{Mic}$, %), avaliados nos tratamentos Mata (vegetação nativa), Past 5 (pastagem com cinco anos de uso), Past 5 IR (pastagem com cinco anos de uso submetida à intervenção de recuperação) e Past 15 (pastagem com quinze anos de uso). As barras representam os valores médios dos tratamentos, e letras distintas sobre as colunas indicam diferenças estatisticamente significativas entre os sistemas de uso do solo, pelo teste de comparação de médias ($p \leq 0,05$).



Fonte: Autores (2025).

Entre os sistemas sob pastejo, observou-se incremento gradual do BMS-C com o tempo de adoção do manejo e com a aplicação contínua de DLS, evidenciado pelos maiores valores no sistema Past 15. O DLS atua como fonte de nutrientes e de compostos orgânicos facilmente assimiláveis, estimulando o crescimento microbiano e aumentando temporariamente os estoques de biomassa (GIACOMINI; AITA, 2008; WOOLIVER *et al.*, 2025). Revisões recentes confirmam que a aplicação de esterco suíno tende a elevar consistentemente o carbono da biomassa microbiana em relação a solos sem adição de resíduos orgânicos, indicando intensificação dos processos biogeoquímicos do solo (YOST *et al.*, 2022; BÜNEMANN *et al.*, 2023).

A biomassa microbiana do solo é amplamente reconhecida como um dos indicadores mais sensíveis às mudanças de manejo, refletindo tanto o aporte de carbono quanto a eficiência metabólica da comunidade microbiana. Em sistemas submetidos a maior distúrbio, observa-se maior dissipação de carbono na forma de CO_2 , enquanto ambientes mais estáveis favorecem a incorporação do carbono

orgânico à biomassa microbiana e a formas mais estabilizadas da matéria orgânica (BENÍCIO, 2025).

Entretanto, esse estímulo microbiano também pode desencadear o efeito *priming*, caracterizado pelo aumento da decomposição de frações mais recalcitrantes da matéria orgânica após a adição de carbono lábil, sobretudo em ambientes com elevado aporte de nitrogênio mineral e uso intensivo do solo (WU *et al.*, 2025). Assim, aumentos no BMS-C nem sempre se traduzem em maior acúmulo de carbono orgânico total, especialmente em sistemas sob distúrbio recorrente.

Os valores de BMS-C observados nos sistemas de pastagem foram inferiores aos relatados para outros solos e sistemas de uso em diferentes regiões do Brasil, evidenciando a forte influência das condições edafoclimáticas, do histórico de uso do solo e da intensidade de manejo sobre a dinâmica da biomassa microbiana (CHERUBIN *et al.*, 2021).

A respiração basal do solo (RBS) também foi significativamente influenciada pelos sistemas de manejo (Figura 3), com maiores valores observados no sistema Past 5 e na Mata, e menores valores nos sistemas Past 5 IR e Past 15. A RBS está associada à disponibilidade de carbono como fonte energética para os microrganismos; contudo, sua magnitude nem sempre é proporcional aos estoques de biomassa microbiana, uma vez que elevadas taxas respiratórias podem indicar tanto alta atividade biológica quanto menor eficiência metabólica ou condições de estresse ambiental (CELIS *et al.*, 2024; WU *et al.*, 2025).

O quociente metabólico (qCO_2) apresentou valores mais elevados nos sistemas sob pastejo, especialmente no Past 5, e valores significativamente menores no sistema Mata. O qCO_2 expressa a quantidade de carbono respirado por unidade de biomassa microbiana e é considerado um indicador da eficiência metabólica da microbiota. Valores elevados refletem maior gasto energético para manutenção celular, geralmente associado a ambientes mais perturbados ou com menor qualidade do substrato orgânico, enquanto valores reduzidos indicam comunidades microbianas mais eficientes e sistemas ecologicamente mais estáveis (SILVA *et al.*, 2015).

O quociente microbiano ($qMic$) foi superior no sistema Past 15, seguido pela Mata e pelo Past 5 IR, enquanto o sistema Past 5 apresentou os menores valores. O $qMic$ expressa a proporção do carbono orgânico total imobilizada na biomassa microbiana e reflete a eficiência de incorporação do carbono pela microbiota. Valores mais elevados indicam sistemas biologicamente mais ativos e com maior potencial de ciclagem interna de nutrientes, enquanto valores reduzidos sugerem estresse microbiano e menor capacidade de imobilização do carbono (SILVA *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2025).

Dessa forma, os resultados indicam que o maior tempo de adoção do manejo aliado às aplicações sucessivas de DLS favoreceu a eficiência na incorporação do carbono orgânico pela biomassa microbiana no sistema Past 15, refletindo melhoria da qualidade microbiológica do solo. Estudos de longo prazo demonstram que a aplicação contínua de esterco suíno promove aumento da biomassa microbiana e alto acúmulo de carbono de origem microbiana, especialmente na forma de necromassa, considerada um componente central do carbono estabilizado no solo (WU *et al.*, 2025).

Por fim, a interpretação conjunta de BMS-C, RBS, qCO_2 e $qMic$ evidencia que sistemas menos perturbados, como a Mata nativa, apresentam comunidades microbianas energeticamente mais eficientes, enquanto sistemas sob manejo

intensivo tendem a apresentar maior dissipação de carbono na forma de CO₂, mesmo diante de elevada atividade microbiana. Revisões recentes também destacam limitações metodológicas em estudos sobre aplicação de DLS, incluindo variações nas doses, ausência de dados iniciais do solo e análises pouco integradas dos atributos físicos, químicos e biológicos, reforçando a necessidade de avaliações de longo prazo e abordagens mais integradas para a correta interpretação da qualidade do solo (YOST *et al.*, 2022; BENÍCIO, 2025).

CONCLUSÕES

O pastejo rotacionado com aplicações sucessivas de DLS modificou os atributos biológicos, microbiológicos e o carbono do solo de forma dependente do tempo de manejo. A mata nativa apresentou alta estabilidade ecológica, com maiores teores de carbono orgânico e biomassa microbiana. Nos sistemas sob pastejo, o longo tempo de adoção do manejo aumentou a biomassa microbiana e a eficiência de incorporação do carbono, especialmente no sistema com quinze anos de uso, embora sem aumento proporcional do carbono orgânico total, indicando efeito priming. A fauna edáfica foi mais abundante nas áreas pastejadas, enquanto a diversidade foi maior nos sistemas mais estáveis ou sob fertirrigação, evidenciando que a qualidade do solo em pastagens resulta da interação entre tempo de manejo, intensidade de uso e dinâmica biológica.

REFERÊNCIAS

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. London: **Academic Press**, 1995.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

BARETTA, D.; TANAKA, C. A. S.; SOUSA, J. P.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; *et al.* Carbon indices to assess quality of management systems in a Subtropical Acrisol. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 1, p. 82–92, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0365>. doi: 10.1590/1678-992X-2017-0365.

BENÍCIO, L. P. F. Soil quality indicators: an integrated review of physical, chemical, and biological aspects. **Scientia Generalis**, v. 6, n. 2, p. 688–705, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.22289/sg.V6N2A69>. doi: 10.22289/sg.V6N2A69.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DIOS, J. L.; *et al.* Soil quality – A critical review of concepts and indicators. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 188, 109020, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109020>. doi: 10.1016/j.soilbio.2023.109020.

CELIS, R. A. O.; GAMBOA, C. H.; PASCUAL, J. A.; ROS, M. Conceptual and practical challenges of assessing soil quality. **Soil Use and Management**, v. 40, e13137, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/sum.13137>. doi: 10.1111/sum.13137.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, D. M. S.; DAVIES, C. A.; *et al.* Soil quality response to land-use change in Brazil: a systematic review and meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 197, p. 218–235, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.028>. doi: 10.1016/j.agee.2014.08.028.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L.; PAVINATO, P. S.; *et al.* Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PLoS ONE**, v. 11, n. 3, e0150860, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>. doi: 10.1371/journal.pone.0150860.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P. A soil management assessment framework for tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 212, 105019, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019>. doi: 10.1016/j.still.2021.105019.

CHERUBIN, M. R.; PINHEIRO JUNIOR, C. R.; SOUZA, L. N.; CANISARES, L. P.; CERRI, C. E. P. Exploring soil health research in Brazil. **Land Use Policy**, v. 157, 107677, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107677>. doi: 10.1016/j.landusepol.2025.107677.

CICHELERO, L. H.; SILVA, D. M.; BOHRER, R. E. G.; SILVA, D. A. A.; REDIN, M.; *et al.* Doses de dejetos líquidos de suínos e seu efeito na germinação de sementes. **Investigación Agraria**, v. 25, n. 1, p. 11–18, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2023.junio.2501724>. doi: 10.18004/investig.agrar.2023.junio.2501724.

CRUZ, C. D. **Programa Genes: biometria**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006.

FERON, S.; CORDERO, R. R.; DAMIANI, A.; MACDONELL, S.; PIZARRO, J.; *et al.* South America is becoming warmer, drier, and more flammable. **Communications Earth & Environment**, v. 5, 501, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01654-7>. doi: 10.1038/s43247-024-01654-7.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C. Emissão de dióxido de carbono após aplicação de dejetos líquidos e cama sobreposta de suínos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 107–114, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000100014>. doi: 10.1590/S0100-204X2008000100014.

GÓRSKA, E. B.; STĘPIEŃ, W.; CUNHA, A.; SIERRA-GARCIA, I. N.; SZYSZKOWSKA, K.; *et al.* Microbial diversity as an indicator of diversified cropping system. **Ecological Indicators**, v. 141, 109133, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109133>. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109133.

GROSS, A.; GLASER, B.; VERCHOT, L.; *et al.* Meta-analysis on how manure application changes soil organic carbon storage. **Global Change Biology**, v. 27, p. 719–736, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.15494>. doi: 10.1111/gcb.15494.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, p. 209–213, 1976. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90005-5). doi: 10.1016/0038-0717(76)90005-5.

LEMOS, A. P.; FREITAS, D. A. F.; ADEYEMO, A. J.; OLIVEIRA, D. M. S. Evaluating potentially toxic elements under prolonged application of pig manure in Brazilian soils. **Discover Applied Sciences**, v. 7, 1373, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07048-4>. doi: 10.1007/s42452-025-07048-4.

LI, G. L.; ZHANG, Y.; FAN, Y.; WANG, C.; LI, B.; *et al.* Organic fertilization enhances soil quality and stabilizes functional redundancy. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 192, 109358, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109358>. doi: 10.1016/j.soilbio.2024.109358.

LIPTZIN, D.; NORRIS, C. E.; CAPPELLAZZI, S. B.; BEAN, G. M.; COPE, M.; *et al.* An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 172, 108708, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108708>. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108708.

LOURENZI, C. R.; CERETTA, C. A.; CIANCIO, N. H. R.; TIECHER, T. L.; SILVA, L. O. S.; *et al.* Forms of nitrogen and phosphorus transfer by runoff. **Agricultural Water Management**, v. 248, 106779, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106779>. doi: 10.1016/j.agwat.2021.106779.

LUZ, F. B.; SILVA, V. R.; MALLMANN, F. J. K.; PIRES, C. A. B.; DEBIASI, H.; *et al.*; Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 281, p. 100–110, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.006>. doi: 10.1016/j.agee.2019.05.006.

MANFREDINI, A.; NANNIPIERI, P.; RENELLA, G.; LANDI, L.; BÅÅTH, E. Soil biodiversity and multifunctionality under organic amendments: a global synthesis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 187, 108938, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108938>. doi: 10.1016/j.soilbio.2023.108938.

MORA-SALGUERO, D. A.; MONTENACH, D.; GILLES, M.; RANJARD, L.; MARON, P. A.; *et al.* Impact of anaerobic digestion on soil microbial quality and carbon dynamics. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, p. 1–15, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-024-02117-9>. doi: 10.1007/s42729-024-02117-9.

NADJIRE, G.; BANDAOGO, A. A.; GEBREMICHAEL, A. W.; OUÉDRAOGO, O.; BOUSSIM, J. I. Can permanganate oxidizable carbon, microbial respiration, and carbon mineralization rate reflect carbon dynamics across land use and pedo-climate gradients? **Frontiers in Soil Science**, v. 5, 1671112, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1671112>. doi: 10.3389/fsoil.2025.1671112.

NICOLOSO, R. S.; LOURENZI, C. R.; BRUNETTO, G. (org.). **Gestão dos resíduos da produção animal**. Brasília: Embrapa, 2024.

OLIVEIRA, D. M. S.; CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L. Soil health indicators in tropical agricultural systems: advances and challenges. **Soil Use and Management**, v. 40, e13121, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/sum.13121>. doi: 10.1111/sum.13121.

REN, T.; XUE, Y.; MIAO, T.; LIU, K.; ZHANG, W.; *et al.* Manure increases temperature sensitivity of soil organic carbon. **Journal of Integrative Agriculture**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.04.012>. doi: 10.1016/j.jia.2024.04.012.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília: **Embrapa**, 2018.

SEMENOV, M. V.; ZHELEZOVA, A. D.; KSENOFONTOVA, N. A.; IVANOVA, E. A.; NIKITIN, D. A.; SEMENOV, V. M. Microbiological indicators for assessing the effects of agricultural practices on soil health: a review. **Agronomy**, v. 15, n. 2, 335, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy15020335>. doi: 10.3390/agronomy15020335.

SILVA, D. M.; ANTONIOLLI, Z. I.; JACQUES, R. J. S.; SILVEIRA, A. O.; SILVA, D. A. A.; *et al.* Indicadores microbiológicos em pastagem com dejetos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1585–1594, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150138>. doi: 10.1590/01000683rbc20150138.

SILVA, D. M.; ANTONIOLLI, Z. I.; JACQUES, R. J. S.; SILVA, D. A. A.; BOHRER, R. E. G. Soil microbial biomass and metabolic indicators in pasture systems receiving swine manure. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0200123, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200123>

SUI, F.; WANG, M.; CUI, L.; QUAN, G.; YAN, J.; *et al.* Pig manure biochar for contaminated soil management. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 257, 114928, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114928>. doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.114928.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6). doi: 10.1016/0038-0717(87)90052-6.

WOOLIVER, R.; KIVLIN, S. N.; JAGADAMMA, S. Microbial communities and their association with soil health indicators under row crop and cover crop diversification: a case study. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, 1664417, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1664417>. doi: 10.3389/fmicb.2025.1664417.

WU, Z.; ZHANG, Y.; FAN, Y.; WANG, C.; LI, B.; *et al.* Decadal manure substitution reshapes microbial communities. **Geoderma**, v. 463, 117581, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117581>. doi: 10.1016/j.geoderma.2025.117581.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467–1476, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>. doi: 10.1080/00103628809368027.

YOST, J. L.; SCHMIDT, A. M.; KOELSCH, R.; SCHOTT, L. R. Effect of swine manure on soil health properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 86, n. 2, p. 450–486, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.20359>. doi: 10.1002/saj2.20359.