



# BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS CANAVIEIRAS COM E SEM TERRACEAMENTO: UMA REVISÃO

Ana Samy de Oliveira Souza<sup>1</sup>, Amanda Eustachio Pereira<sup>2</sup>, Jean Evens Alcinat<sup>3</sup>, Edneia Aparecida de Souza Paccola<sup>4</sup>, José Eduardo Gonçalves<sup>5</sup>, Francielli Gasparotto<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Mestranda em Tecnologias Limpas, PPGTL, Universidade Cesumar – UNICESUMAR. Bolsista ICETI-UniCesumar/Fundação Araucária. [anasamily07@gmail.com](mailto:anasamily07@gmail.com)

<sup>2</sup>Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, PR, Brasil. Bolsista CAPES. [maeustachio1998@hotmail.com](mailto:maeustachio1998@hotmail.com)

<sup>3</sup>Mestrando em Tecnologias Limpas, PPGTL, Universidade Cesumar – UNICESUMAR. Bolsista ICETI-UniCesumar/Fundação Araucária. [alcinajeanevens@gmail.com](mailto:alcinajeanevens@gmail.com)

<sup>4</sup>Doutora, Docente no Curso de Agronomia e do Programa de Pós-graduação em Tecnologias Limpas, Universidade Cesumar - UNICESUMAR. Pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação – ICETI. [edneia.paccola@unicesumar.edu.br](mailto:edneia.paccola@unicesumar.edu.br)

<sup>5</sup>Doutor Co-orientador, Docente do Programa de Pós-graduação em Tecnologias Limpas, Universidade Cesumar - UNICESUMAR. Pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação – ICETI. [jose.goncalves@unicesumar.edu.br](mailto:jose.goncalves@unicesumar.edu.br)

<sup>6</sup>Doutora Orientadora, Docente no Curso de Agronomia e do Programa de Pós-graduação em Tecnologias Limpas, Universidade Cesumar - UNICESUMAR. Pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação – ICETI. [francielli.gasparotto@unicesumar.edu.br](mailto:francielli.gasparotto@unicesumar.edu.br)

## RESUMO

A qualidade do solo é um componente essencial para a sustentabilidade agrícola, influenciando diretamente a produtividade, a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. A microbiota do solo desempenha papel central na manutenção desses processos, atuando na ciclagem de nutrientes, formação da estrutura do solo e proteção contra a degradação. A cultura da cana-de-açúcar, economicamente relevante no Brasil, sobretudo na região Noroeste do Paraná, é cultivada predominantemente em solos arenosos, que apresentam alta vulnerabilidade à erosão hídrica. Nesse contexto, o terraceamento agrícola emerge como uma prática conservacionista estratégica para o controle da erosão, melhoria da infiltração hídrica e manutenção da saúde do solo. Entretanto, a retirada desse sistema em algumas áreas pode comprometer atributos físicos, químicos e biológicos do solo, afetando a sustentabilidade da produção. Esta revisão bibliográfica tem como objetivo analisar os efeitos do terraceamento e de outras práticas de manejo conservacionista na qualidade microbiológica do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, com ênfase em solos arenosos. Foram avaliados indicadores microbiológicos sensíveis, como a biomassa microbiana e a atividade enzimática, que refletem a resposta rápida do solo às práticas agrícolas. Os resultados apontam que o manejo conservacionista, especialmente o uso do terraceamento, é fundamental para preservar a funcionalidade do solo, promovendo a sustentabilidade ambiental e econômica da cultura. A análise crítica da literatura reforça a importância do monitoramento contínuo dos bioindicadores para orientar práticas agrícolas que assegurem a conservação dos recursos naturais e a produtividade a longo prazo no contexto do cultivo de cana-de-açúcar no Paraná.

**PALAVRAS-CHAVE:** Práticas Conservacionistas; Agricultura Sustentável; Cana-de-açúcar; Microrganismos do Solo.

## 1 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural não renovável, composto por partículas minerais, água, ar, matéria orgânica e organismos vivos, cuja qualidade resulta da interação complexa entre esses componentes. Essa qualidade é fundamental para a sustentabilidade dos ecossistemas, influenciando a produtividade agrícola, a biodiversidade e a qualidade dos recursos naturais (Silva et al., 2021). A microbiota do solo desempenha papel central nesses processos, regulando a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e a formação de agregados, essenciais para a saúde do solo (Leal et al., 2021).

No entanto, práticas agrícolas inadequadas, associadas a fatores naturais, têm acelerado a degradação do solo, comprometendo sua capacidade de sustentar a produção agrícola de forma sustentável (Barbosa; Oliveira, 2022). No contexto brasileiro, a cultura da cana-de-açúcar destaca-se pela relevância econômica e pelo potencial de adoção de



práticas conservacionistas, especialmente na região Noroeste do Paraná, caracterizada por solos arenosos vulneráveis à erosão hídrica (CONAB, 2025; SEAB, 2025).

Entre as técnicas conservacionistas, o terraceamento agrícola tem papel fundamental no controle da erosão, promovendo a melhoria da infiltração e a conservação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Contudo, a retirada dessa prática em algumas áreas pode prejudicar a saúde do solo e a produtividade da cultura (Telles et al., 2022).

Diante deste cenário, a avaliação dos indicadores microbiológicos do solo emerge como ferramenta sensível para monitorar os impactos do manejo agrícola e orientar estratégias sustentáveis. Esta revisão tem como objetivo analisar criticamente a literatura científica sobre os efeitos do sistema de terraceamento e outras práticas conservacionistas na qualidade microbiológica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, com foco em solos arenosos, visando subsidiar manejos que promovam a sustentabilidade agrícola na região do Paraná.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

Trata-se de uma pesquisa bibliográfica básica, realizada por meio da análise de artigos, teses, dissertações, livros e publicações técnicas disponíveis nas bases SciELO, ScienceDirect, Periódicos CAPES e repositórios institucionais. A investigação focou em atributos do solo relacionados à microbiota como indicadores de qualidade e na avaliação dos efeitos do terraceamento sobre a saúde do solo na cultura da cana-de-açúcar.

Foram utilizados os descritores “qualidade do solo”, “indicadores microbiológicos do solo”, “atividade enzimática em solos cultivados”, “terraceamento agrícola”, “práticas conservacionistas agrícolas” e “cultura da cana-de-açúcar”. Os critérios de inclusão abrangeram publicações em português e inglês, com relevância para manejo conservacionista e bioindicadores na cultura canavieira.

A metodologia compreendeu três etapas: (1) busca sistemática nas bases selecionadas; (2) triagem de títulos e resumos conforme os critérios; e (3) leitura crítica e síntese das informações relevantes para os objetivos do estudo. O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica de natureza básica, conduzida a partir da análise de publicações técnicas e científicas disponíveis nos portais SciELO, ScienceDirect e Periódicos CAPES, bem como em repositórios institucionais de universidades e centros de pesquisa.

## **3 Desenvolvimento**

### **3.1. Conservação do solo como pilar da sustentabilidade agrícola**

O solo é definido como um conjunto de corpos naturais, composto por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais e dinâmicos, compostos por materiais minerais e orgânicos. É considerado um sistema vivo, habitat de inúmeros e diversos organismos, que atuam em diversas funções no solo, essenciais para o funcionamento do ecossistema terrestre (Bunemann et al., 2018).

Montenegro et al. (2020) considera o solo um recurso multifuncional, que atua como base para a produção agrícola e segurança alimentar, controle de processos hidrológicos e biogeoquímicos, desempenhando serviços ecossistêmicos essenciais para a melhoria da qualidade de vida. Seus atributos químicos, físicos e biológicos estão integrados de maneira funcional.



No sistema agrícola, o solo possui diversas funções, atuando na manutenção da produtividade, na ciclagem de nutrientes, fluxo e purificação da água, regulação climática, habitat para a macro e microfauna (Silva et al., 2021). Esses serviços ecossistêmicos do solo estão relacionados à qualidade desse recurso, definida como a capacidade de sustentar a produtividade dentro dos limites de um ecossistema, natural ou manejado, para a manutenção da diversidade de organismos que nele habitam, além de garantir a qualidade da água e do ar, bem como a segurança alimentar da população mundial (Creamer et al., 2022).

A degradação do solo é um processo que reduz a capacidade do solo de desempenhar suas funções ecológicas (Barbosa; Oliveira, 2022). Fenômenos como o intemperismo provocam esses processos naturalmente no ambiente, entretanto, práticas antrópicas como a intensificação agrícola e má gestão de recursos naturais, aceleram o desenvolvimento desse fenômeno, comprometendo todo o equilíbrio ecológico (Montenegro et al., 2020).

Segundo Griebeler et al. (2005) uma das principais causas da degradação do solo é a erosão hídrica, causada pelo impacto direto das gotas de chuva sobre o solo e pelo escoamento superficial excessivo. Esse fenômeno envolve a desagregação, transporte e deposição de partículas de solo, sendo resultado de fatores como o potencial erosivo das chuvas, uso e manejo do solo, declividade, susceptibilidade do solo à erosão.

Back et al. (2021) explicam que a energia responsável pela erosão é gerada pelo potencial erosivo das chuvas aliado à declividade do terreno. Em contrapartida, fatores como a estrutura do solo, sistema de manejo agrícola e a adoção de práticas conservacionistas atuam como barreiras que dissipam essa energia. Schmidt Filho et al. (2025) afirmam que os impactos desse fenômeno não se restringem ao solo onde ocorrem, estendem-se também aos corpos hídricos, devido ao assoreamento e a poluição provocados pelo transporte de sedimentos.

Solos originados do arenito Caiuá, possuem textura porosa e granular, favorecendo a infiltração de água, mas apresentam baixa estabilidade de agregados e predominância de areia fina. Essa fragilidade estrutural resulta em baixa retenção de água e nutrientes, tornando-os suscetíveis à erosão, especialmente em eventos de chuva intensa com escoamento superficial (Schmidt Filho et al., 2025).

Machado e Wadt (2017) e Schmidt Filho et al. (2025) concordam que a topografia acidentada intensifica essa vulnerabilidade ao favorecer o escoamento superficial da água, o que, conseqüentemente, eleva as taxas de erosão hídrica. Técnicas de conservação mecânica envolvem a alteração da inclinação do solo, influenciando o escoamento superficial e permitindo o uso agrícola de encostas íngremes. Dentre essas técnicas destacam-se o uso de terraços, canais de drenagem e barreiras de pedras ou rochas.

O terraceamento agrícola é a técnica mecânica de conservação mais utilizada, tanto em nível nacional quanto estadual. Os terraços, são estruturas conservacionistas formadas por camalhões e canais dispostos transversalmente ao declive do terreno, são projetados conforme a inclinação, tipo de solo, uso e manejo. Embora haja diversos tipos e finalidades, eles são amplamente reconhecidos como uma solução eficaz para o controle da erosão. Ao reduzir o escoamento superficial e aumentar a infiltração de água no solo, o terraceamento melhora consideravelmente as condições para a prática agrícola (Machado e Wadt, 2017; Back et al., 2021).

Todavia, apesar da popularização dessa técnica, tem-se observado a remoção de terraços em áreas de produção de cana-de-açúcar no Estado do Paraná e em outras regiões do Brasil. De acordo com Telles et al. (2022) essa alteração no manejo do solo



pode afetar não apenas as características físicas e químicas do solo, mas também a população microbiana, resultando em uma possível diminuição da qualidade do solo.

Fortini et al. (2020) afirmam que a adoção de práticas agrícolas adaptadas às características edafoclimáticas da área de cultivo, que reduzam os riscos de degradação dos solos, favoreçam a produção de alimentos seguros e a manutenção da biodiversidade animal e vegetal, são fundamentais para assegurar alta produtividade sem comprometer a sustentabilidade do sistema.

O termo sustentabilidade possui um conceito amplo, abrangendo aspectos sociais, econômicos e ambientais. De acordo com estudiosos, a sustentabilidade pode ser entendida como a habilidade de um sistema se manter ao longo do tempo, mesmo quando sujeito a alterações. Além disso, não se limita a um objetivo, mas deve ser considerada como um conjunto de alternativas para determinado objetivo, buscando equilíbrio em um ambiente dinâmico (Mascarenhas et al., 2020; Passos; Khan, 2019; Fortini et al., 2020).

Segundo Nthebere et al. (2025) a sustentabilidade na agricultura pode ser definida como a capacidade dos sistemas agrícolas de se manterem produtivos a longo prazo, por meio de práticas que promovam a preservação ambiental, o bem-estar social e a viabilidade econômica. Esse conceito abrange a adoção de tecnologias e métodos que minimizem os impactos ambientais, preservem os recursos naturais e promovam a saúde e qualidade de vida dos agricultores e das comunidades (Passos; Khan, 2019).

Em 25 de setembro de 2015, a ONU estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas como parte da Agenda 2030, acordada pelo Brasil e 192 países. Esses objetivos visam erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima, e garantir paz e prosperidade para todos. A agricultura sustentável e as práticas de manejo e conservação do solo estão alinhadas principalmente com os objetivos 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), 6 (Água Potável e Saneamento), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Climática) (ONU, 2015).

Pesquisadores (Nthebere et al., 2025; Fortini et al., 2020; Telles et al., 2022; Back et al., 2021) concordam que a agricultura sustentável objetiva obter rendimentos a longo prazo, por meio da aplicação de tecnologias de manejo mais ecologicamente adequadas. Os sistemas de manejo do solo englobam as diversas técnicas disponíveis para a preparação do solo, com o intuito de reduzir o uso de insumos químicos e práticas agrícolas intensivas. As operações envolvidas nesses sistemas incluem plantio, adubação, controle de plantas invasoras e conservação do solo (Mascarenhas et al., 2020).

O preparo convencional, que envolve intensa mobilização do solo, por muito tempo foi o método predominante no sul do Brasil. Contudo, devido à intensificação de processos erosivos dos solos causados por esse sistema, foram adotados sistemas de produção como preparo reduzido, cultivo mínimo e plantio direto, sendo este último, o mais utilizado atualmente (Back et al., 2021; Fortini et al., 2020).

### **3.2. Sustentabilidade no cultivo da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma gramínea originária do Sudeste Asiático que normalmente é cultivada em áreas tropicais ou subtropicais, pertence à família Poaceae e possui um ciclo de cultivo semiperene. É uma planta cultivada para fins agrícolas, utilizada principalmente como matéria-prima na fabricação de açúcar e etanol (Lin et al., 2024).

O Brasil detém uma das maiores áreas de cultivo de cana-de-açúcar no mundo. Sua indústria lidera na produção de açúcar, de bioenergia comercial a partir da biomassa e de etanol, substituindo cerca de 40% da gasolina no Brasil. Como maior produtor mundial de



cana-de-açúcar e pioneiro na produção de etanol, o país se destaca no mercado global de biocombustíveis (Vian, 2022).

Segundo Montagnham e Shikida (2012) a atividade canavieira está presente em 25 dos 26 estados do Brasil e abrange cerca de 1.042 municípios, representando 20% do total de municípios brasileiros. Este setor é significativo para a geração de empregos e desenvolvimento local, especialmente em municípios cuja economia é fortemente ligada à produção de cana-de-açúcar e seus derivados. Por conseguinte, o cultivo da cana-de-açúcar desempenha um papel significativo no cenário socioeconômico do Brasil. Além disso, abrange mais de 72.000 agricultores e 373 usinas sucroalcooleiras em operação ou projeto no Brasil.

O quarto levantamento da produção de cana-de-açúcar realizado pela CONAB (2025) para a safra 2024/25 afirma que o volume estimado no país é de 677 milhões de toneladas, representando uma redução de 5,1% em relação à safra anterior. Embora a área colhida tenha aumentado 5,2%, a produtividade média apresentou queda de 9,8%, devido às intempéries climáticas ocorridas ao longo do ciclo produtivo.

A Região Centro-Sul, é responsável por 91% da produção do país. O Paraná é o 5º maior produtor, com estimativa de 507 mil hectares cultivados em 2025. A expectativa é de que a colheita alcance aproximadamente 36,7 milhões de toneladas em todo o estado (SEAB, 2025). O Estado possui mais de 20 usinas instaladas em funcionamento, com a maior concentração da cultura na região noroeste, cujos solos predominantes são de textura arenosa (CONAB, 2025).

Dentro desse contexto, para suprir a necessidade de matéria-prima do setor sucoenergético, em termos de quantidade e qualidade, é essencial um planejamento detalhado das atividades ao longo de todo o ciclo da cultura. Isso inclui desde a preparação do solo até a colheita (Arcoverde et al., 2019). Um manejo adequado do solo favorece a sua agregação, aumenta a porosidade e diminui a compactação, resultando em uma melhor aeração do solo, no desenvolvimento das raízes da planta, nas interações biológicas e na disponibilidade de nutrientes (Luca et al., 2018).

Segundo a CONAB (2020), a agroindústria sucroalcooleira brasileira diferencia-se pela adoção de práticas sustentáveis que contribuem para a conservação dos recursos naturais. Dentre essas práticas, destaca-se o uso de terraços em áreas com relevo acidentado, técnica que tem se mostrado eficaz na contenção de encostas, redução da erosão hídrica, retenção de água no perfil do solo e melhoria da infiltração, fatores determinantes para a sustentabilidade da produção agrícola (Fiorentin, 2016).

Adicionalmente, a implementação do plantio direto associado à manutenção da palhada no solo após a colheita e o controle de tráfego agrícola por meio de tecnologias de precisão, como GPS e sistemas auto pilotados, têm promovido melhorias significativas na qualidade física do solo. Essas práticas contribuem para o aumento do estoque de carbono orgânico, a diminuição da compactação e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) no sistema de produção sucroalcooleiro (Zamunér Filho, 2015).

Além da implementação dessas práticas sustentáveis, é fundamental o monitoramento contínuo de seus impactos sobre a saúde do solo para garantir a eficácia e a sustentabilidade a longo prazo. O monitoramento permite identificar alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, possibilitando ajustes nas estratégias de manejo para prevenir a degradação e promover a recuperação do solo (Barbosa; Oliveira, 2022).

Segundo Silva et al. (2021) podem ser utilizadas diversas metodologias para este acompanhamento, como a análise periódica da matéria orgânica do solo, capacidade de troca catiônica, pH, compactação e infiltração de água. Além disso, o uso de sensores



remotos e tecnologias de geoprocessamento tem ampliado a capacidade de monitoramento espacial e temporal em grandes áreas de cultivo (Silveira et al., 2020).

Portanto, o monitoramento sistemático não só assegura a manutenção da produtividade da cana-de-açúcar, mas também reforça o compromisso do setor sucroalcooleiro com a conservação ambiental e a sustentabilidade agrícola.

### **3.3. Bioindicadores de manejo sustentável na cultura da cana**

O monitoramento sistemático das práticas agrícolas no cultivo da cana-de-açúcar é essencial para garantir a sustentabilidade e a produtividade a longo prazo. Para além das análises físicas e químicas do solo, a avaliação da comunidade microbiana tem se destacado como um método sensível e eficiente para diagnosticar a saúde do solo e os impactos das intervenções agrícolas (Silveira et al., 2020). Nesse contexto, os bioindicadores, especialmente os microrganismos e suas atividades metabólicas, emergem como ferramentas valiosas para o acompanhamento da qualidade edáfica, oferecendo informações integradas sobre a dinâmica biológica e os processos essenciais ao equilíbrio do solo cultivado (Cavalcante et al., 2023).

As comunidades microbianas do solo mantêm um equilíbrio ecológico que pode ser profundamente afetado pela espécie cultivada, pelo manejo do solo, pela aplicação de insumos e por condições climáticas predominantes, como temperatura e umidade (Silva et al., 2021). Processos essenciais, como a decomposição da matéria orgânica, a nitrificação, a fixação biológica de  $N_2$  e a formação de agregados do solo são em grande parte controlados pela microbiota do solo (Leal et al., 2021).

Os organismos que compõem a fauna do solo são amplamente reconhecidos como bioindicadores devido à sua sensibilidade às mudanças no ecossistema. Eles respondem a essas alterações por meio de reações comportamentais ou metabólicas mensuráveis (Bunemann et al., 2018). Os atributos microbianos do solo, como a diversidade de microrganismos, respiração basal, atividade enzimática e biomassa microbiana, são indicadores sensíveis que podem ser utilizados para monitorar alterações ambientais decorrentes do uso agrícola (Faquim et al., 2024).

Sistemas de cultivo conservacionistas, que minimizam a perturbação do solo e adotam práticas como a rotação de culturas e o acúmulo de matéria orgânica, promovem maior qualidade e atividade biológica do solo, resultando em níveis mais elevados de enzimas ao longo do tempo (Silva et al., 2021). As comunidades microbiológicas distintas respondem de forma diferente aos fatores físico-químicos do solo, sendo fortemente influenciadas pelo manejo agrícola. Em contrapartida, os grupos microbianos divergem quanto à sua capacidade de influenciar processos e propriedades fundamentais que impactam diretamente a qualidade do solo (Miguel et al., 2020).

Segundo Barbero et al. (2025) a biomassa microbiana é considerada a parte viva do solo, consistindo em frações de carbono, nitrogênio e fósforo, além dos fungos, bactérias e demais organismos presentes no solo. Esse atributo reflete os estresses gerados no sistema solo que afetam a densidade, a diversidade e a atividade das populações microbianas. Fatores como a manutenção de material vegetal no solo (palhada), teor de umidade do solo, textura do solo, temperatura impactam a atividade microbiana (Nthebere et al., 2025).

A respiração microbiana do solo (respiração basal) representa a oxidação da matéria orgânica por organismos aeróbios do solo, que utilizam  $O_2$  como aceptor final de elétrons até a formação de  $CO_2$ . A partir desse conceito, o quociente  $qCO_2$  avalia a eficácia do substrato utilizado pelos microrganismos, sendo calculado pela relação entre a RBS e a



unidade de carbono biogênico no solo. Dessa forma, o  $qCO_2$  revela a quantidade de carbono que se perde na forma de gás  $CO_2$  durante a respiração microbiana. (Souza et al., 2021).

A atividade enzimática tem como objetivo examinar o estado metabólico das populações microbianas presentes no solo, avaliando a quantidade de grupos de microrganismos envolvidos na dinâmica da matéria orgânica. Essa atividade pode ser quantificada por meio de diversos tipos de enzimas, como a fosfatase ácida,  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase (Mendes et al., 2019).

As fosfatases representam um grupo de enzimas responsáveis por catalisar a hidrólise de ésteres e anidridos de fosfato ( $PO_4^{3-}$ ). Nessas reações, as moléculas orgânicas que contêm radicais fosforados são quebradas, resultando na liberação de álcool e ácido fosfórico. Essas enzimas podem funcionar em condições ideais tanto de acidez quanto de alcalinidade. Além disso, pode ser associada à deficiência de fósforo no solo e ao crescimento das plantas, é diretamente influenciada pela adubação (Scabora; Maltoni; Cassiolato, 2010).

A  $\beta$ -glicosidase é uma enzima que pode ser encontrada em solos, animais, plantas e microrganismos. Ela desempenha o papel de catalisadora na etapa final da degradação da celulose, hidrolisando resíduos de celobiose e liberando glicose na forma de carbono disponível, o que proporciona energia para os microrganismos (Sherene, 2017). A  $\beta$ -glicosidase serve como um importante indicador da qualidade do solo, pois reflete a atividade biológica anterior, revela os impactos do manejo do solo e a capacidade de estabilizar e proteger as enzimas, além de ser resistente às variações sazonais (Mendes et al., 2019)

A arilsulfatase é uma enzima crucial no ciclo do enxofre no solo, desempenhando um papel vital ao hidrolisar ligações éster de sulfato, resultando na liberação de íons sulfato (Tabatabai; Bremmer, 1970). A atividade da arilsulfatase é responsável por cerca de 70% do enxofre disponível no solo. Pesquisadores relataram que em solos do tipo Latossolo Vermelho Distrófico as enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase, juntas ou separadamente, foram os indicadores mais sensíveis para detectar alterações no solo em função do sistema de manejo (Mendes et al., 2019).

#### **4 CONCLUSÃO**

A revisão evidencia que o manejo conservacionista, especialmente o terraceamento agrícola, desempenha papel fundamental na preservação da qualidade do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, sobretudo em solos arenosos vulneráveis à erosão. A manutenção desses sistemas contribui significativamente para a estabilidade física, química e biológica do solo, garantindo a sustentabilidade ambiental e a produtividade econômica da cultura. Além disso, a incorporação de bioindicadores microbiológicos no monitoramento da saúde do solo representa uma ferramenta eficaz para avaliar os impactos das práticas agrícolas e orientar decisões de manejo mais sustentáveis. Portanto, reforça-se a necessidade de adoção e manutenção de práticas conservacionistas adaptadas às condições locais, bem como de investimentos contínuos em pesquisa e monitoramento, para assegurar a conservação dos recursos naturais e a longevidade dos sistemas produtivos sucroalcooleiros.



## REFERÊNCIAS

ARCOVERDE, Sálvio Napoleão Soares. et al. Crescimento inicial de cultivares de cana-de-açúcar em plantio de inverno sob preparos conservacionistas do solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 2, p. 142-156, 2019. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i2.803>. Acesso em: Abr. 2025.

BACK, Alvaro José. et al. O reconhecimento do terraceamento como prática de agricultura conservacionista em Santa Catarina, Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 12, p. 119048–119066, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/41700>. Acesso em: Abr. 2025.

BARBOSA, Tiago da Costa Silva; OLIVEIRA, Vlândia Pinto Vidal de. Chemical and biological soil quality indicators used in monitoring degradation in the semiarid environments an analysis the state of the art. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 3, p. 17403–17423, 2022. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/45006>. Acesso em: 09 ago. 2025.

BARBERO, Florencia M. et al. Impact of land use changes on soil chemical properties, enzyme activities and microbial communities in two contrasting localities of the Argentinian Pampas. **Applied Soil Ecology**, v. 206, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105836>. Acesso em: mai. 2025.

BUNEMANN, Else K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v.20, p.105-125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. Acesso em: abr. 2025

CAVALCANTE, Fernando Gouveia. et al. Grupos funcionais do solo: papel das comunidades microbianas especializadas na ciclagem de nutrientes e sensores de distúrbios ambientais. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, [S. l.], v. 15, n. 9, p. 8676–8698, 2023. DOI: 10.55905/cuadv15n9-038.

CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2024/25 - Quarto Levantamento, Brasília, v. 12, n. 4, p. 1-45, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-boletins/4o-levantamento-safra-2024-25/boletim-cana-de-acucar-4o-levantamento-2024-25>. Acesso em: abr. 2025.

CREAMER, Rachel E. et al. The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 166, 2022. ISSN 0038-0717. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071722000189>. Acesso em: abr. 2025

FAQUIM, Ana Caroline da S. et al. Microbiological attributes in Oxisol cultivated with sugarcane in savanna region of Central Brazil. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**, 28(11), DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n11e283796>.



FERREIRA, Enderson Petrônio de Brito; STONE, Luis Fernando; MARTIN-DIDONET, Claudia Cristina Garcia. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção1. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 1, p. 22–31, jan. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/Rg5L5zBmmxzRr5Jn4YtjHXq/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

FIORENTIN, Ailton Moisés Xavier. **Efeitos da mecanização agrícola da cultura da cana-de-açúcar nos processos erosivos: dimensionamento de terraços com base na Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS)**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. doi:10.11606/D.18.2016.tde-01062016-153206. Acesso em: 05 jun. 2025

FORTINI, Rosimeire Miranda; BRAGA, Marcelo José; FREITAS, Carlos Octávio. Impacto das práticas agrícolas conservacionistas na produtividade da terra e no lucro dos estabelecimentos agropecuários brasileiros. **Revista De Economia E Sociologia Rural**, v. 58, e199479.

GRIEBELER, Nori P. et al. Modelo para o dimensionamento e a locação de sistemas de terraceamento em nível. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 696–704, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000300015>. Acesso em: mai. 2025.

LEAL, Maria Lorreyne de Araújo. et al. Effect of management systems and land use on the population of soil microorganisms. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e21910917966, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i9.17966.

LIN, Haidong. et al. Metagenome-based diversity and functional analysis of culturable microbes in sugarcane, **Microbiology Spectrum**, v. 13, ed. 1, 2024. ISSN 2165-0497 Disponível em: <https://doi.org/10.1128/spectrum.01982-24>. Acesso em: jun. 2025.

LUCA, Edgar Fernando de. et al. Effect of conversion from sugarcane preharvest burning to residues greentrashing on SOC stocks and soil fertility status: Results from different soil conditions in Brazil. **Geoderma**, n.310, p. 238-248, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.020>. Acesso em: jun. 2025.

MACHADO, Pedro Luiz O. Almeida; WADT, Paulo Guilherme S. Boas práticas agrícolas: Terraceamento. **Embrapa Acre-Documentos**, 2017. 9p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/13599347/ID01.pdf>. Acesso em: abr. 2025.

MASCARENHAS, Nágela M. H. et al. Modelos de agricultura sustentável: biodinâmica e sistema silvipastoril. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 43, n. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.19084/rca.20853>.

MENDES, Ieda de Carvalho. et al. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85–93, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.



MIGUEL, Divino Levi. et al. Soil microbiological properties and enzyme activity in agroforestry systems compared with monoculture, natural regeneration, and native caatinga. **Bioscience Journal**, v. 1, p. 16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n1a2020-42704>

MONTAGNHAM, Bruno Astolphi; SHIKIDA, Pery Francisco Assis. Base econômica e desenvolvimento local: Estudo de caso múltiplo em município canavieiro. **Revista Economia e Desenvolvimento**, v.24, n.2, p.107-125, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/eed/article/view/6705/pdf>. Acesso em: abr. 2025.

MONTENEGRO, A.A.A. et al. Impacto de métodos naturais para conservação de água e solo no semiárido brasileiro. **FAVE Sección Ciencias Agrarias**, v. 19, n. 2, p. 45-59, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.org.ar/pdf/fave/v19n2/1666-7719-fave-19-02-45.pdf>. Acesso em: mai. 2025.

NTHEBERE, Knight. et al. Conservation agricultural practices promoted arbuscular mycorrhizal fungal colonization and glomalin content on sandy clay loam of southern India, **Heliyon**, v. 11, 2025, ISSN 2405-8440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41196>.

OLIVEIRA, Manoel Henrique Reis de. et al. Gestão dos resíduos pós colheita da cana-de-açúcar no cerrado: uso da palhada versus contribuição econômica. **Brazilian Journal of Development**, 2020; 6(1): 3406-3421. DOI:10.34117/bjdv6n1-246.

PASSOS, Ana Tereza Bittencourt; KHAN, Ahmad Saeed. O impacto do PRONAF sobre a sustentabilidade agrícola de agricultores familiares na microrregião do vale do médio Curu, no estado do Ceará. **Economia Aplicada**, São Paulo, Brasil, v. 23, n. 4, p. 53–78, 2019. DOI: 10.11606/1980-5330/ea169979.

PINTO, Guilherme Silva. et al. Estimativa das perdas de solo por erosão hídrica utilizando o Método de Erosão Potencial. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, Brasil, v. 39, p. 62–71, 2020. DOI: 10.11606/rdg.v39i0.160233.

SCABORA, Maria Helena; MALTONI, Kátia Luciene; CASSIOLATO, Ana Maria Rodrigues. Crescimento, fosfatase ácida e micorrização de espécies arbóreas, em solo de cerrado degradado. **Bragantia**, v. 69, n. 2, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000200024>.

SCHMIDT FILHO, Edison. et al. Qualidade do solo e dinâmica hidrossedimentológica na mesorregião Noroeste do Paraná. In: BARBOSA, Graziela Moraes de Cesare. et al. Manejo e conservação de solo e água: volume 2 – resultados da hidrossedimentometria e atributos do solo. Rede Paranaense de Agropesquisa e Formação Aplicada. Curitiba: SENAR/PR, p. 309-339, 2025.

SEAB (Secretaria da Agricultura e do Abastecimento - Paraná). Departamento de Economia Rural – DERAL. Boletim de Conjuntura Agropecuária – Semana 20 de 2025. Curitiba: SEAB/DERAL, 2025. Disponível em: [https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos\\_restritos/files/documento/2025-05/boletim\\_semana\\_20\\_deral.pdf](https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2025-05/boletim_semana_20_deral.pdf). Acesso em: 8 jun. 2025.



SHERENE, T. Role of Soil Enzymes in Nutrient Transformation: A Review. **Bio Bulletin**, v. 3, p. 109 - 131, 2017. Disponível em: <https://www.biobulletin.com/articles/role-of-soil-enzymes-in-nutrient-transformation-a-review.pdf>. Acesso em: jun. 2025.

SILVA, Michelangelo de Oliveira. et al. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v. 1, pág. 6853–6875, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-463>.

SILVEIRA, Jane Maria de Carvalho. et al. Uso de imagens multiespectrais e termográficas para monitoramento das condições hídricas da cana-de-açúcar. **IRRIGA**, v. 25, n. 4, p. 689–696, 2020. DOI: [10.15809/irriga.2020v25n4p689-696](https://doi.org/10.15809/irriga.2020v25n4p689-696).

SOUZA, Paulino Taveira de. et al. Variabilidade espacial da biomassa e atividade microbiana do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 1949–1967, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509861902>.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 34. P. 225-229, 1970. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400020016x>

TELLES, Tiago Santos. et al. Soil management practices adopted by farmers and how they perceive conservation agriculture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 46, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210151>.

VIAN, Carlos Eduardo Freitas. Séries Históricas. **EMBRAPA Cana-de-açúcar**, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/socioeconomia/estatisticas/series-historicas>. Acesso em: abr. 2025.

ZAMUNÉR FILHO, A. N. **Planejamento e projeto de áreas de cana-de-açúcar: conservação do solo e logística da colheita**. 2015. Tese (Doutorado em Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. doi:10.11606/T.18.2015.tde-26082015-085108. Acesso em: 05 Jun. 2025.