

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

MANEJO DO SOLO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

BRUNO HENRIQUE PENNACCHI ZUNFRILLI

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Fernandes

Trabalho apresentado à Faculdade
de Ciências Agrárias e Veterinárias -
UNESP, Câmpus de Jaboticabal,
para graduação em ENGENHARIA
AGRONÔMICA.

JABOTICABAL - SP

2024

Z95m

Zunfrilli, Bruno Henrique Pennachi

Manejo do solo para a cultura da cana-de-açúcar / Bruno Henrique Pennachi Zunfrilli. -- Jaboticabal, 2024
37 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Carolina Fernandes

1. Açúcar cana. 2. Saccharum officinarum. 3. Sugar-cane. 4. Plantas açucareiras cultivo. 5. Agrocombustíveis. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus Jaboticabal



BRUNO HENRIQUE PENNACCHI ZUNFRILLI

MANEJO DO SOLO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Fernandes

Área de Concentração: Física do Solo

Data da defesa: 09/08/2024

☒ Aprovado
() Reprovado

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Carolina Fernandes

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Me. Ingrid Silva Setúbal

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Me. Jairo Neves de Oliveira

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 24/08/2024

Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força, determinação e saúde ao longo desta jornada acadêmica.

Aos meus familiares, dedico minha mais profunda gratidão pelo amor incondicional, apoio constante e paciência. Vocês foram meu alicerce nos momentos de dificuldade e a inspiração para continuar sempre em frente. Cada palavra de encorajamento e gesto de carinho foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos, agradeço pela parceria, pelos momentos de descontração que trouxeram leveza a este percurso e pelo apoio nos momentos de desafio. Vocês tornaram esta caminhada mais significativa e reforçaram o valor da amizade como fonte de energia e motivação.

A minha orientadora, Prof.^a Carolina Fernandes, expresso meu sincero agradecimento pela orientação, dedicação e paciência. Sua experiência, confiança no meu potencial e incentivo foram cruciais para a realização deste trabalho. A sua paixão pela pesquisa me motivou a buscar sempre o melhor e ampliar meus horizontes acadêmicos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com palavras de incentivo, compartilhamento de conhecimentos ou apoio emocional. Este trabalho é fruto de um esforço coletivo e de todos aqueles que estiveram ao meu lado ao longo deste percurso.

Muito obrigado(a)!

ÍNDICE

ÍNDICE.....	II
RESUMO.....	IV
SUMARY.....	V
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Cana-de-açúcar	3
1.2 Os subprodutos da cana-de-açúcar	5
1.3 A importância da qualidade do solo	7
2 ATRIBUTOS DO SOLO.....	9
2.1 Atributos químicos do solo	9
2.2 Atributos físicos do solo	13
2.3 Atributos Biológicos do solo	17
3 MANEJO DE SOLO.....	20
3.1 Cultivo convencional	21
3.2 Cultivo mínimo	24
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
REFERÊNCIAS	27

RESUMO

A cana-de-açúcar, originária da Oceania, se adaptou bem às condições climáticas tropicais e subtropicais do Brasil. A planta é cultivada comercialmente por propagação vegetativa e é capaz de se desenvolver mesmo em condições adversas. É uma cultura que possui papel significativo na produção de açúcar, álcool e aguardente, consequentemente um papel importante na história agrícola e industrial do Brasil durante o período colonial. O objetivo deste trabalho é analisar e comparar as diferentes práticas de manejo do solo aplicadas à cultura da cana-de-açúcar, com foco em seus impactos sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, visando identificar técnicas que maximizem a produtividade agrícola e promovam a sustentabilidade ambiental a longo prazo. O manejo do solo é definido como todas as atividades aplicadas ao sistema solo/planta que visam aumentar a produtividade agrícola e evitar degradações ambientais, sendo necessário conhecimento sobre o clima e a cultura. O preparo do solo envolve processos como revolvimento de camadas superficiais para reduzir a compactação, incorporação de corretivos e fertilizantes, e aumento dos espaços porosos, melhorando assim a permeabilidade e o armazenamento de ar e água. Também é ressaltado o cuidado na utilização correta das técnicas de preparo do solo, pois o uso equivocado pode levar à degradação progressiva do solo. Em situações em que a cana-de-açúcar será cultivada pela primeira vez, recomenda-se a realização de aração profunda com antecedência ao plantio, para a destruição, incorporação e decomposição dos restos culturais existentes. Além disso, comparativamente aos sistemas de cultivo com baixo revolvimento, o preparo do solo promove sua aeração, mas pode levar à degradação de seus atributos físicos, químicos e biológicos. Por outro lado, a adoção de cultivos com baixo revolvimento pode melhorar as propriedades do solo e aumentar a disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo.

Palavras-Chave: Cana-De-Açúcar; Cultivos; Manejo Do Solo

SUMARY

Sugarcane, originally from Oceania, has adapted well to the tropical and subtropical climatic conditions of Brazil. The plant is commercially cultivated through vegetative propagation and can grow even under adverse conditions. It plays a significant role in the production of sugar, alcohol, and spirits, and has had a major impact on Brazil's agricultural and industrial history during the colonial period. The aim of this study is to analyze and compare different soil management practices applied to sugarcane cultivation, focusing on their impacts on the physical, chemical, and biological properties of the soil, with the goal of identifying techniques that maximize agricultural productivity and promote long-term environmental sustainability. Soil management is defined as all activities applied to the soil/plant system aimed at increasing agricultural productivity and preventing environmental degradation, requiring knowledge of the climate and the crop. Soil preparation involves processes such as tilling the top layers to reduce compaction, incorporating soil amendments and fertilizers, and increasing porous spaces, thereby improving air and water permeability and storage. Proper use of soil preparation techniques is emphasized, as improper use can lead to progressive soil degradation. In situations where sugarcane is being cultivated for the first time, deep plowing is recommended before planting to break up, incorporate, and decompose existing crop residues. Additionally, compared to low-tillage systems, soil preparation promotes aeration but can degrade the physical, chemical, and biological attributes of the soil. Conversely, the adoption of low-tillage cultivation systems can enhance soil properties and increase nutrient availability over time.

Keywords: Sugarcane; Crops; Soil Management

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, originária da Oceania, onde hoje situa-se a ilha de Nova Guiné, é uma planta de clima tropical e subtropical, como é o caso do Brasil, um dos motivos de sua boa adaptação na região (Medina, 2022).

A cana-de-açúcar é uma planta cultivada comercialmente por propagação vegetativa e consegue se desenvolver mesmo em condições adversas em diferentes regiões do mundo (Medina, 2022). É uma cultura monocotiledônea e pertencente à família Poaceae, planta fina, de formato cilíndrico, fibrosa e com folhas longas (Segato; Cláudia; Mattiuz, 2006). A parte de maior interesse na cana-de-açúcar é o caule, também chamado de colmo, é nessa região da planta onde está armazenada a sacarose, a qual pode ser relacionada com três importantes agroindústrias: açúcar, álcool e aguardente (Cortez; Magalhaes.; Happi, 1992).

O ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar tem duração média de cinco anos e, é caracterizado por quatro estádios principais: emergência (cana-planta) ou brotação (cana-soca), perfilhamento, alongação do colmo e maturação. O crescimento da cana-de-açúcar pode ser dividido em três etapas, ou fases. A primeira etapa, fase inicial, tem duração média de 200 dias após o plantio e é caracterizada pelo crescimento lento. A segunda etapa tem duração de 200 a 400 dias após o plantio, é caracterizada pelo rápido crescimento e alto acúmulo de massa. Já na terceira etapa, a fase final, tem duração média de 400 a 500 dias, após o plantio, é caracterizada por um crescimento lento e apresenta baixo acúmulo de massa total (Crusciol *et al.*, 2010)

A cana-de-açúcar tem uma longa e significativa história no Brasil, sendo uma das culturas mais importantes desde a colonização portuguesa. A trajetória da produção de cana-de-açúcar no Brasil pode ser dividida em vários períodos, cada um marcado por diferentes desafios e avanços tecnológicos.

A introdução da cana-de-açúcar no Brasil ocorreu no início do século XVI, com a chegada dos portugueses. A primeira lavoura foi estabelecida em 1533, na Capitania de São Vicente. As condições climáticas favoráveis e o solo fértil do Nordeste brasileiro permitiram o rápido desenvolvimento da cultura. Durante

o período colonial, o açúcar tornou-se o principal produto de exportação do Brasil, especialmente para a Europa, financiando a expansão territorial e econômica do país.

Na era do Brasil colonial, o açúcar proveniente da cana-de-açúcar representou a primeira grande riqueza industrial e agrícola do Brasil e por muito tempo foi a base da economia colonial. Ao final do século XVII, a descoberta de ouro em Minas Gerais fez com que a cana-de-açúcar perdesse importância no cenário comercial, retraindo sua produção até por volta do século XIX (D'agostini et al., 2009).

Com a independência do Brasil em 1822 e a abolição da escravidão em 1888, a produção de cana-de-açúcar passou por diversas transformações. A introdução de novas tecnologias e práticas de manejo, como a mecanização e a utilização de fertilizantes, contribuiu para o aumento da produtividade e a expansão da área cultivada³. No entanto, a concorrência internacional e as crises econômicas afetaram a indústria açucareira brasileira, que enfrentou períodos de declínio.

A partir da década de 1970, o Brasil começou a investir fortemente na produção de etanol como alternativa ao petróleo, especialmente após a crise do petróleo de 1973. O Programa Nacional do Álcool (Proálcool), lançado em 1975, incentivou a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, revitalizando a indústria sucroalcooleira. Esse programa não só ajudou a reduzir a dependência do petróleo importado, mas também posicionou o Brasil como líder mundial na produção de etanol.

Hoje, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e um dos principais exportadores de açúcar e etanol. A produção nacional supera 710 milhões de toneladas por safra, gerando bilhões de reais em receitas e milhões de empregos diretos e indiretos. A cana-de-açúcar é utilizada não apenas para a produção de açúcar e etanol, mas também para a geração de energia elétrica a partir do bagaço e a fabricação de produtos como plásticos biodegradáveis e cosméticos.

Na presente safra, o Brasil continuará a manter sua posição proeminente como principal produtor global de açúcar, mesmo diante do desafio de expandir

a produção de biocombustíveis. Em São Paulo, a safra 2023/24 encerra com uma produção estimada em 677.602,1 mil toneladas (crescimento de 10,9% em relação à safra passada, estabelecendo um novo recorde na série histórica da Conab). As condições climáticas ocorridas durante a safra 2022/23 tiveram impactos significativos na safra 2023/24 (CONAB, 2023).

No início da safra, as chuvas abundantes e contínuas proporcionaram condições favoráveis para o desenvolvimento das plantações de cana-de-açúcar, resultando em um vigor vegetativo ampliado. Contudo, a partir do segundo semestre, a escassez de chuvas retardou o crescimento e prejudicou o desempenho ideal dos canaviais. Mesmo assim, a produtividade nacional está estimada em 81.129 kg/ha, representando um aumento de 10,1% em relação à safra 2022/23 (CONAB, 2023).

1.1 Cana-de-açúcar

O Açúcar Total Recuperável (ATR) é um indicador fundamental na produção de cana-de-açúcar, refletindo a quantidade de açúcares que podem ser efetivamente convertidos em produtos como açúcar e etanol. Este índice é crucial tanto para a rentabilidade dos produtores quanto para a eficiência das usinas sucroalcooleiras.

Ribeiro (2021) enfatiza que o ATR é um indicador que representa a qualidade da cana e a capacidade de ser transformada em açúcar ou álcool. Soares (2024), por sua vez, ressalta que o ATR impacta diretamente a rentabilidade e eficiência dos produtores e usinas.

A importância do ATR reside em sua capacidade de medir a qualidade da cana-de-açúcar. Quanto maior o teor de açúcares recuperáveis, maior será a quantidade de produtos finais obtidos a partir da mesma quantidade de matéria-prima. Isso significa que o ATR impacta diretamente o rendimento na produção de açúcar e etanol (Ribeiro, 2021). Além disso, o ATR está intimamente ligado à

produtividade agrícola, pois os produtores buscam constantemente otimizar suas práticas para maximizar o teor de açúcares na cana.

O monitoramento do ATR ao longo das safras fornece informações importantes para ajustes nas técnicas de cultivo, escolha de variedades de cana mais produtivas e adaptações às condições climáticas. Do ponto de vista industrial, as usinas utilizam o ATR como um indicador de eficiência e rentabilidade. A gestão adequada do processo de extração, tratamento e fermentação é essencial para garantir a máxima conversão do ATR em produtos finais de alta qualidade (Soares, 2024).

Além disso, o ATR desempenha um papel crucial nas estratégias de precificação e comercialização da cana-de-açúcar. Os contratos entre produtores e usinas muitas vezes envolvem pagamentos baseados no teor de ATR, refletindo a valorização dos açúcares recuperáveis. No contexto global, o ATR torna-se ainda mais significativo quando consideramos a competitividade do setor sucroalcooleiro no mercado internacional (Ribeiro, 2021).

Em um levantamento realizado pela CONAB em 2023 para safra 2023/2024 de cana-de-açúcar, o qual incluiu informações como produção de açúcar total recuperável (ATR), açúcar, álcool, etanol e os sistemas de colheita, observou-se que apesar do desafio em aumentar a produção de biocombustíveis, o Brasil continuaria em destaque como maior produtor de açúcar mundial (CONAB, 2023).

Constatou-se que no estado de São Paulo apesar dos investimentos para renovação das lavouras, a área colhida deverá ser menor que na safra 2022/2023. Além disso, a região sudeste concentra a maior produção do país e deverá ter um aumento do volume colhido em 12,2% com relação à safra anterior 2022/23. Outro fator de interferência, é com relação as melhores condições climáticas que juntamente com investimentos em renovação serão responsáveis por um aumento do rendimento médio, com estimativa de produtividade chegando a 85.046 kg/ha (CONAB, 2023).

Segundo a CONAB (2023) o resultado obtido de açúcares total recuperável (ATR) é inferior ao obtido no fechamento da safra 2022/23, sendo

assim, as usinas esperam que o aumento do THC (Toneladas de Cana por hectare) compense a redução nos valores de ATR.

1.2 Os subprodutos da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura que garante um excelente aproveitamento, tanto do seu produto, quanto de seus subprodutos para atender ao mercado interno e externo. Seus subprodutos são utilizados na alimentação humana e animal, na fertilização de solos e na cogeração de energia, destacando o bagaço, a torta de filtro e a vinhaça, entre outros (Cortez; Magalhaes; Happi, 1992).

A produção do bagaço depende diretamente do teor de fibra presente na cana-de-açúcar, sendo um dos subprodutos mais importantes da indústria sucroenergética. O bagaço é amplamente utilizado como combustível para caldeiras, na produção de celulose, e como componente da alimentação de gado confinado. De fato, entre 60% e 90% desse bagaço é empregado pelas próprias usinas como fonte de energia (Alcarde, 2022; Goldemberg, 2008). Esse aproveitamento tem um impacto direto na sustentabilidade do setor, reduzindo a dependência de fontes externas de energia e contribuindo para uma matriz energética mais limpa (Dias *et al.*, 2011). Ao ser processado, o bagaço transforma-se em um resíduo fibroso, originado da extração do caldo pelas moendas, correspondendo a aproximadamente 30% do volume total da cana moída (Alcarde, 2022; Leal, 2013).

Outro subproduto importante é a torta de filtro, rica em fósforo, com uma umidade média de 75%, sendo amplamente utilizada como fertilizante agrícola. Essa torta pode ser obtida por meio da filtração mecânica do caldo durante a produção de açúcar ou durante a produção de etanol, quando o caldo passa por um processo de clarificação (Alcarde, 2022). A produção da torta de filtro varia entre 20 e 40 quilos por tonelada de cana processada (Alcarde, 2022; Silva *et al.*, 2010). Além de seu uso agrícola, estudos recentes indicam o potencial de aprimoramento do uso desse resíduo, como fonte de nutrientes, especialmente

em solos pobres ou degradados, melhorando a produtividade das culturas (Oliveira *et al.*, 2014).

O melaço, subproduto gerado na proporção de 40 a 60 quilos por tonelada de cana processada, é amplamente utilizado na produção de álcool etílico, além de ser matéria-prima essencial em processos biotecnológicos. Dentre suas aplicações, destacam-se a produção de proteínas, rações animais, levedura prensada para panificação, e o desenvolvimento de antibióticos e outros compostos bioquímicos (Alcarde, 2022; Silva *et al.*, 2010). A sua versatilidade como matéria-prima biotecnológica faz com que o melaço seja um insumo valioso tanto para a indústria de alimentos quanto para a farmacêutica (Mussatto; Roberto, 2004).

O óleo fúsel, outro subproduto da indústria sucroalcooleira, é composto por uma mistura de álcoois etílico e superiores, furfural, aldeídos e ácidos graxos. Utilizado como matéria-prima para a produção de álcoois com diferentes graus de pureza e como base para a síntese de solventes e outras substâncias químicas, o óleo fúsel é produzido na proporção de 0,05 a 0,2 litros para cada 100 litros de álcool. A sua composição é variável, dependendo da qualidade da matéria-prima e do álcool produzido (Alcarde, 2022; Basso *et al.*, 2011).

O álcool bruto, mistura impura de água e álcool, é utilizado como combustível ou para a produção de álcool extrafino e neutro, essenciais para indústrias farmacêuticas e cosméticas. Sua produção varia de 1 a 5 litros por 100 litros de álcool, em função das características da matéria-prima e das condições operacionais do processo de destilação (Alcarde, 2022).

A levedura seca, obtida por meio da secagem de uma parte do "leite de levedura" sangrado durante a fermentação, é rica em proteínas (cerca de 35%) e vitaminas do complexo B, sendo amplamente utilizada na formulação de rações animais. Sua produção atinge aproximadamente 2,5 quilos por 100 litros de álcool (Alcarde, 2022). Além de seu valor nutricional, a levedura seca tem se mostrado uma alternativa sustentável para a alimentação animal, contribuindo para o aproveitamento integral dos subprodutos da fermentação alcoólica (Silva *et al.*, 2009).

A vinhaça, subproduto da destilação do vinho, tem como principal aplicação a fertilização de solos, devido à sua riqueza em nutrientes, como potássio e matéria orgânica. Além disso, a vinhaça também é utilizada na alimentação de animais, na produção de biomassa proteica e para a geração de biogás (metano) por meio de biodigestores, contribuindo para a matriz energética sustentável (Alcarde, 2022; Oliveira *et al.*, 2014). A produção de vinhaça varia entre 12 a 18 litros por litro de álcool, dependendo da qualidade da matéria-prima processada, e seu uso agrícola tem sido uma prática comum em sistemas de fertirrigação, especialmente no cultivo de cana-de-açúcar (Christofolletti *et al.*, 2013).

1.3 A importância da qualidade do solo

O planeta Terra como um todo exerce diversas funções, que são de extrema importância para a produção agrícola e para o bem-estar humano. Energia, gases, filtro, substrato e regulador de fluxo de água são exemplos dessas diversas funções que são base de sustentação dos seres vivos. A qualidade do solo está ligada às suas características naturais (intrínsecas), mas também ligada aos fatores externos, como interações com o ecossistema, usos e práticas de manejo (Vezzani; Mielniczuk, 2009).

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade do solo de desempenhar suas funções essenciais, incluindo a sustentação do crescimento das plantas, a manutenção da biodiversidade, a regulação do ciclo da água e dos nutrientes, além de atuar como um filtro natural para poluentes. Um solo de qualidade é aquele que mantém um equilíbrio adequado entre suas propriedades físicas, químicas e biológicas, possibilitando a produção agrícola sustentável e minimizando os impactos ambientais.

De acordo com Doran e Parkin (1994), a qualidade do solo está diretamente relacionada à sua funcionalidade em um sistema agrícola, sendo influenciada tanto por fatores naturais quanto pelas práticas de manejo adotadas. Solos com boa estrutura física, por exemplo, possuem adequada porosidade e

drenagem, características que favorecem o desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes. Por outro lado, a qualidade química do solo está associada à sua fertilidade, capacidade de fornecer nutrientes essenciais às plantas, e ao equilíbrio entre os elementos tóxicos e benéficos presentes no perfil do solo (Andrews *et al.*, 2004).

Além disso, a qualidade biológica do solo desempenha um papel crucial, uma vez que os microrganismos do solo são responsáveis por processos vitais como a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes. A biodiversidade no solo é um indicador importante da sua saúde, e solos ricos em organismos benéficos tendem a ser mais resilientes e produtivos (Tótola *et al.*, 2015). O manejo inadequado, como o uso excessivo de fertilizantes e defensivos agrícolas, podem degradar essa qualidade, levando à compactação, erosão e perda de fertilidade, o que compromete a capacidade produtiva do solo a longo prazo (Silva *et al.*, 2010).

Quando se trata das características naturais do solo, pouco pode ser feito para melhorá-las. Portanto, é possível focar na manutenção de fatores externos, como os atributos físicos, químicos e biológicos, por meio do manejo correto ou mais adequado do solo para determinada área. Além disso, vale ressaltar a importância da capacidade do solo de produzir por longos períodos em altos níveis de eficiência, algo que está diretamente relacionado à qualidade do solo (Vezzani; Mielniczuk, 2009).

Nos últimos anos, tem ocorrido um aumento significativo no número de estudos sobre o solo, com o objetivo de avaliar o quanto ele está comprometido quimicamente, fisicamente e biologicamente para o uso de diferentes culturas.

A cana-de-açúcar, por exemplo, é uma cultura que possui um ciclo de aproximadamente cinco anos. Entre esses ciclos, ocorre a reforma do canavial, quando o preparo do solo é realizado em área total, visando melhorar o desenvolvimento da planta.

Essa cultura faz uso intensivo de maquinários pesados desde o cultivo, passando pela manutenção da lavoura, até a colheita. Como resultado, essa tem alterado a estrutura do solo, o que compromete o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar (Sá; Santos Junior; Franz, 2016).

Com o objetivo de obter melhores resultados de produtividade, por meio do melhor desenvolvimento das raízes, durante o período de reforma do canavial, realiza-se normalmente o preparo convencional do solo, ou seja, aração, gradagem e escarificação em área total. Segundo Sá; Santos Junior e Franz (2016), esse tipo de preparo nem sempre é eficiente, pois apresenta efeito temporário, ou seja, a longo prazo vai ocorrer a degradação dos atributos físicos do solo, consequentemente dos químicos e biológicos.

Souza; Souza e Silva (2014) relatam também que o preparo em área total consome muita energia, aumentando os custos de produção, tanto quanto a poluição, devido a emissão de CO₂ na atmosfera.

De acordo com Maurício *et al.* (2017), a utilização de técnicas de manejo que envolvem uma menor mobilização do solo foi uma solução adotada para minimizar esses impactos. Entre essas técnicas, destaca-se o preparo mínimo do solo, que envolve a movimentação apenas necessária do solo, evitando sua perturbação excessiva.

Um exemplo dessa prática é a escarificação do solo, que consiste no uso de um implemento agrícola chamado escarificador, responsável por romper camadas compactadas do solo em profundidade, mas sem revirá-lo completamente como seria feito em um preparo convencional. O objetivo é melhorar a infiltração de água e a aeração do solo, ao mesmo tempo em que se mantém a estrutura superficial relativamente intacta, reduzindo o risco de erosão e a perda de nutrientes.

Essas práticas visam conservar a qualidade do solo, melhorando sua capacidade produtiva a longo prazo e reduzindo a compactação causada pelo uso contínuo de maquinários agrícolas.

2 ATRIBUTOS DO SOLO

2.1 Atributos químicos do solo

A fim de aumentar o rendimento agrícola de determinada área ou cultura, o conhecimento dos atributos químicos dos solos é essencial. A avaliação detalhada desses atributos permite entender a disponibilidade de nutrientes, o equilíbrio entre os elementos e a capacidade de troca catiônica, todos fundamentais para a nutrição das plantas. Sendo assim, o conhecimento sobre a dinâmica de liberação dos nutrientes para a planta possibilita ajustar as recomendações de manejo e adubação, de modo a garantir que os nutrientes estejam disponíveis no momento adequado e em quantidades equilibradas. A adubação deve ser cuidadosamente planejada, pois tanto a deficiência quanto o excesso de nutrientes podem ser prejudiciais à saúde da planta e à qualidade do solo.

A deficiência de nutrientes pode causar desnutrição nas plantas, reduzindo o crescimento e a produção, enquanto o excesso pode levar à toxicidade, impactando negativamente o desenvolvimento das culturas e o ecossistema circundante. Além disso, o manejo inadequado da fertilização pode alterar o pH do solo, afetando diretamente a sua fertilidade e a biodisponibilidade de certos nutrientes (Malavolta, 2006).

Um dos principais problemas associados à má gestão de fertilizantes e irrigação é o aumento da salinidade do solo. O acúmulo de íons insolúveis, como sódio, cloreto e sulfato, devido à irrigação inadequada, resulta na salinização, o que compromete a estrutura do solo e dificulta a absorção de água pelas raízes. Como consequência, a produtividade agrícola é severamente reduzida em áreas afetadas por solos salinos, exigindo a adoção de práticas de manejo sustentável para minimizar esses efeitos (Santos, 2010; FAO, 2021).

Portanto, a adoção de um manejo eficiente que considere os atributos químicos do solo e a necessidade nutricional das culturas é essencial para garantir o equilíbrio ideal entre a produtividade agrícola e a preservação dos recursos naturais. A implementação de práticas como o uso racional de fertilizantes, a rotação de culturas e a irrigação controlada são estratégias eficazes para maximizar a eficiência do uso de nutrientes, evitando problemas de salinidade e contribuindo para a sustentabilidade agrícola a longo prazo (Siqueira et al., 2011).

Os atributos químicos do solo são muitas vezes citados como indicativos da fertilidade do solo, isso porque os teores de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) indicam se as reservas do solo atenderão as necessidades nutricionais das plantas. A disponibilidade destes nutrientes para as plantas, com exceção do N, é controlada principalmente pela CTC (Capacidade de Troca de Cátions), ou seja, a quantidade de cargas ocupadas por estes elementos trocáveis. Além da CTC, o pH também é importante do ponto de vista da fertilidade do solo, visto que com o aumento da acidez, os íons H^+ tendem a ocupar espaço nas cargas negativas do solo, aumentando a lixiviação e reduzindo a quantidade de bases disponíveis para as plantas. (Barros *et al.*, 2010).

Em relação ao nitrogênio, este presente no solo principalmente na forma de íons nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+), sendo estas as formas absorvidas pelas plantas.

A disponibilidade de nitrogênio para as plantas depende principalmente dos processos de transformação de resíduos orgânicos, como restos culturais, e também da matéria orgânica do solo. Por isso, a gestão do nitrogênio no solo envolve práticas como a adubação adequada, a rotação de culturas e o uso de leguminosas que fixam nitrogênio.

Um estudo realizado na Região de Ribeirão Preto - SP por Oliveira *et al.* (2014), verificou alteração nos atributos do solo, no caso de substituição da vegetação nativa por um sistema agrícola de cana-de-açúcar. Os autores verificaram que os com cultivo de cana-de-açúcar aumentaram a CTC, as argilas dispersas, e umidade do solo até 20 cm de profundidade. Enquanto os solos de mata nativa apresentaram maior atividade enzimática. Apesar disso, os autores sugerem que estes atributos, isoladamente, não são bons indicadores de qualidade do solo, porém, quando usados em conjunto são sensíveis as alterações de manejo e condições climáticas impostas a diferentes sistemas de cultivo.

Outro fator importante, é a neutralização da acidez é fundamental para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Apesar de já terem sido desenvolvidos materiais genéticos tolerantes a determinados níveis de acidez,

os produtos mais utilizados na agricultura para correção da acidez do solo ainda são os calcários, em razão da sua alta efetividade e do seu custo mais baixo (Carvalho *et al.*, 2012).

Íons e moléculas polarizadas, presentes no solo, são atraídos e ligados de forma reversível a componentes do solo com superfície carregada presente nas argilas coloidais, nas substâncias húmicas e nos sesquióxidos de ferro, Ronquim (2020).

As partículas com superfície carregada, presentes nesses componentes, é chamada de coloide, que responsável pelo aumento de cargas negativas do solo (CTC). Nos solos existem três tipos de coloides: os minerais de argila, os óxidos e o húmus. As argilas e o húmus apresentam maior quantidade de cargas negativas em relação aos óxidos, por isso, solos que apresentam maiores teores de argila e de matéria orgânica, também apresentam maior CTC a Ph7. Sendo assim, representa a capacidade de liberação de vários nutrientes, beneficiando a manutenção de fertilidade e reduzindo possíveis efeitos tóxicos da aplicação de fertilizantes (Ronquim, 2020).

Segundo Ronquim (2020), a CTC pode ser considerada importante indicador de potencial produtivo afetando o solo em altos ou baixos valores. Quando a sua maior parte estiver ocupada por cátions potencialmente tóxicos ao invés de essenciais, esse pode ser considerado um solo com baixo potencial produtivo. Já um solo com baixo valor de CTC, é um solo mais propenso a lixiviação, sendo assim é recomendada adubações e calagens em aplicações parceladas.

Além da CTC efetiva, citada na maior parte do texto até aqui, não podemos esquecer de citar a importância da CTC a pH7, visto que essa mede a quantidade total de cargas negativas que um solo tem em um determinado volume. Quanto maior é a CTC a pH 7, maior é a resistência a mudança de pH (poder tampão), sendo necessário a aplicação de uma maior dose de calcário, porém, com menor frequência, sendo mais recorrente em solos argilosos.

A correção da acidez ativa do solo é de suma importância para o apropriado desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, apesar de já terem sido desenvolvidos materiais genéticos tolerantes a determinados níveis de

acidez, os produtos mais utilizados na agricultura para correção da acidez do solo ainda são os calcários, em razão da sua alta efetividade e do seu custo mais baixo (Carvalho *et al.*, 2012).

2.2 Atributos físicos dos solos

Os atributos físicos do solo funcionam como indicadores de qualidade do solo e fatores que influenciam a produtividade da cultura da cana-de-açúcar, entre eles, textura do solo, estrutura do solo, densidade do solo, resistência à penetração das raízes, capacidade de água disponível e percolação da água (Castro *et al.*, 2013).

Do ponto de vista de manejo de solo, o cultivo da cana-de-açúcar é um dos mais agressivos para os atributos físicos dos solos, devido à utilização de operações com máquinas em diferentes fases do cultivo, e que ainda pode ser agravado em condições de umidade inadequada, causando grandes problemas com a compactação do solo e consequentemente prejuízo ao desenvolvimento das plantas já que a resistência mecânica do solo à penetração de raízes pode limitar o crescimento do sistema radicular e a produtividade da cultura (Vaz *et al.*, 2002).

Um experimento foi conduzido na Embrapa Pecuária Sudeste, por Vaz *et al.* (2002) a fim de se obter medidas da resistência à penetração em épocas secas e úmidas, por meio da utilização de penetrômetro de impacto. Os penetrômetros são equipamentos que medem a resistência oferecida pelo solo à penetração de uma ponta cônica. As medidas foram realizadas nas faixas de umidade estabelecidas entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, uma vez que em solos muito úmidos não há diferenciação da medida e em solos muito secos a medida é muito demorada e dificultada pela excessiva resistência do solo.

Os resultados mostraram que a resistência à penetração varia significativamente com a umidade do solo. Em solos mais secos, a resistência à penetração foi maior, dificultando o crescimento das raízes e a infiltração de

água. Em contrapartida, em solos mais úmidos, a resistência foi menor, facilitando esses processos¹.

Os dados indicaram que há uma faixa ideal de umidade em que a resistência à penetração é minimizada, o que é crucial para o manejo adequado do solo e para a maximização da produtividade agrícola. Esses resultados são importantes para orientar práticas de manejo que visem manter o solo em condições ótimas de umidade, evitando tanto a compactação excessiva quanto a saturação hídrica.

Um solo arenoso pode apresentar um valor de RP (resistência à penetração) a determinada umidade, enquanto um solo mais argiloso pode apresentar a mesma RP, porém com um valor mais alto de umidade. Vazet *al.* (2002) exemplifica mostrando que o solo mais arenoso, apresenta valor de RP = 5 MPa em aproximadamente 10% de umidade, enquanto o solo mais argiloso, apresenta o mesmo valor de RP, mas para 35% de umidade.

Um estudo conduzido por Oliveira Filho (2016), em uma área experimental onde em cada talhão possui uma extensão de 10 hectares, e há variações em relação às datas de plantio e às variedades de cana-de-açúcar cultivadas entre esses talhões. Nesse estudo a caracterização física do solo da área experimental desempenhou um papel crucial, onde diversas variáveis foram consideradas, incluindo densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade. Para obter essas informações, amostras indeformadas foram coletadas em trincheiras com dimensões de 0,50 x 0,50 x 0,50 metros, localizadas no centro de cada talhão.

Os resultados da pesquisa indicaram que quanto maior a profundidade, maior a resistência a penetração do solo. Ao analisar as diferentes camadas, observou-se que a camada superficial (0-10cm) apresentava a menor compactação, com uma média de RP de 2,09 MPa, considerada baixa. A partir dessa camada, a RP aumentou consideravelmente, atingindo valores elevados na camada de 11-20 cm (5,57 MPa) e valores ainda maiores entre 21 e 30 cm (6,60 MPa), chegando ao maior valor entre 31 e 40 cm (7,33 MPa), que foi identificada como a camada mais compactada (Oliveira Filho, 2016).

Os resultados também indicaram que a compactação do solo poderia ter sido evitada em cerca de 18,80% da área total. De acordo com Oliveira Filho (2016), nas áreas de descompactação, a atividade deveria ser realizada a uma profundidade maior do que 40 centímetros. Esse estudo, forneceu informações valiosas sobre a estrutura do solo na área investigada, as variações na resistência à penetração e as recomendações para a descompactação adequada do solo.

No estado de São Paulo, a maioria das áreas de cultivos são localizadas em regiões que possuem Latossolo Vermelho, mas há produção em regiões de Argissolos. Os Latossolos são solos, mais ácidos, pobres em nutrientes, mais profundos e intemperizados, mas que em compensação o fácil manejo e alta porosidade tornam esse solo um ambiente com alto potencial produtivo. Já os Argissolos apresentam variações nos teores de argila, o que ocasiona, muitas vezes uma nítida diferenciação dos horizontes destes que devido serem mais sensíveis à erosão, demandam a utilização de práticas e manejos que auxiliem na conservação do mesmo (IAC, 2014).

Os agregados são formados pela união natural de partículas minerais e orgânicas de solo. Essas estruturas são uma característica importante da qualidade física do solo, pois influenciam a capacidade do solo de reter água, permitem a infiltração de água e o movimento do ar, além de afetarem o desenvolvimento das raízes das plantas (Vasconcelos *et al.*, 2010).

Os agregados do solo são formados por meio de diversos processos físicos, químicos e biológicos que atuam ao longo do tempo. Eles podem variar em tamanho, forma e estabilidade. Agregados estáveis são aqueles que resistem à desagregação quando submetidos a forças físicas, como chuva intensa ou irrigação. A presença de agregados estáveis é um indicativo de um solo bem-estruturado e saudável, enquanto a falta de agregados pode resultar em problemas como compactação do solo, baixa infiltração de água e dificuldades para as plantas enraizarem (Vasconcelos *et al.*, 2010).

A irrigação e a definição correta de cultivares de cana-de-açúcar são essenciais para gerar maior agregação e, conseqüentemente, maior conservação do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Essas escolhas

contribuem para a conservação do solo, pois a cultivar atua na formação de macroagregados, auxiliando na estruturação do solo, retenção e infiltração de água no solo, o que pode maximizar a eficiência da irrigação aumenta devido a maior retenção de umidade provocada pela melhoria da estrutura do solo.

A melhoria da estrutura do solo faz com que reduza o corrimento superficial e aumente a infiltração, reduzindo a erosão. Além disso, a estabilidade dos agregados confere resistência a compactação pelo tráfego de máquinas e pelo impacto de gotas de chuva. (Magalhães *et al.*, 2021).

Os principais fatores que influenciam a formação e estabilidade dos agregados do solo incluem a matéria orgânica presente, a atividade biológica do solo, os minerais constituintes, a textura do solo (tamanho das partículas) e os processos químicos que ocorrem no ambiente do solo (Vasconcelos *et al.*, 2010).

Foram realizadas medidas da resistência à penetração, área e profundidade mobilizada, e percentual de agregados do solo antes e após o preparo do solo. O sistema de preparo adotado permitiu maior uniformidade nas classes de agregados e reduziu a resistência à penetração na camada de 0 a 0,20 m. A fração grossa do solo, a umidade e o carbono orgânico contribuíram positivamente para uma maior área mobilizada e profundidade do perfil.

Além disso, é importante ressaltar que o sistema de preparo do solo e a variedade da cultura permitiram maior uniformidade nas classes dos agregados, com uma profundidade de sulco de 0,31 m. A utilização da grade e do sulcador no preparo do solo resultou em diminuições significativas na resistência à penetração, com uma redução de 45% na camada de 0 a 0,20 m e de 20% na camada de 0,20 a 0,40 m. No preparo do solo apenas com o sulcador, observaram-se reduções de 17% e 12% nas camadas de 0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m, respectivamente (Tavares, 2017).

Segundo Tavares *et al.* (2017), a umidade mais adequada para a avaliação da resistência à penetração é o teor de umidade equivalente à capacidade de campo, pois essa condição apresenta uma forte correlação com o desenvolvimento das raízes das plantas. No Argissolo estudado, os valores estimados de umidade gravimétrica na capacidade de campo foram de 9% para a camada de 0-0,20 m e 10% para a camada de 0,20-0,40 m.

A agregação está diretamente relacionada com a porosidade do solo, que representa o espaço em que ocorrem os processos dinâmicos dos gases e da solução do solo. Essas áreas estão diretamente relacionadas com a densidade volumétrica do solo, pois quanto maior o espaço ocupado pelas partículas, menor será o volume do espaço poroso (Magalhães *et al.*, 2021).

O estudo realizado em área de Latossolo Vermelho, localizada no município de Rio Brilhante-MS, na Usina Eldorado teve como objetivo caracterizar dois sistemas de manejo da colheita da cana-de-açúcar, com queima e sem queima. Concluiu-se que a colheita da cana-de-açúcar sem queima resultou em melhorias na produtividade, além de matéria-prima de qualidade superior e contribuir para a preservação do ambiente. Dentre os vários fatores que requerem avaliação, as variadas condições de solo, condições de clima, variedade de cana e ciclo de cultivo, destacaram-se as alterações nas propriedades físicas do solo (Carvalho *et al.*, 2012).

2.3 Atributos Biológicos do solo

Os atributos biológicos do solo referem-se aos componentes vivos e às suas atividades, que desempenham um papel essencial na manutenção da saúde do solo e na sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas. Esses atributos incluem a presença de microrganismos, como bactérias, fungos, actinomicetos, e macrofauna, como minhocas, insetos e outros organismos que interagem diretamente com a matéria orgânica e os nutrientes presentes no solo.

A atividade biológica do solo está intimamente relacionada ao ciclo de nutrientes, especialmente à decomposição da matéria orgânica e à mineralização dos nutrientes essenciais às plantas, como nitrogênio, fósforo e enxofre. Os microrganismos do solo são fundamentais para a decomposição da matéria orgânica, liberando nutrientes que podem ser assimilados pelas plantas. Além disso, esses organismos desempenham um papel crucial na agregação do solo, melhorando sua estrutura física e a capacidade de infiltração e retenção de água, o que favorece o crescimento das raízes e o desenvolvimento saudável das plantas (Moreira; Siqueira, 2006).

Outro aspecto importante dos atributos biológicos do solo é a sua capacidade de atuar no controle biológico de pragas e doenças. Organismos benéficos, como fungos micorrízicos e bactérias promotoras do crescimento de plantas (PGPRs), podem competir com patógenos ou inibir o desenvolvimento de microrganismos nocivos, ajudando a reduzir a incidência de doenças nas plantas. Além disso, minhocas e outros macro-organismos contribuem para a aeração do solo e facilitam o transporte de nutrientes, ao criar canais que permitem o movimento de água e ar no perfil do solo (Lavelle; Spain, 2001).

Segundo Moraes *et al.* (2014) dois atributos microbiológicos mais utilizados para caracterizar o solo, o primeiro atributo é a biomassa microbiana do solo (BMS) que é utilizada como um indicador de atividade da parte viva da matéria orgânica do solo. O segundo atributo é o "C prontamente mineralizável," o qual desempenha um papel fundamental na avaliação da atividade de mineralização do solo. Por outro lado, as propriedades biológicas apresentam-se como indicadores sensíveis para monitorar as modificações ocorridas no solo, tornando possível a análise das transformações decorrentes das práticas agrícolas empregadas.

Em um estudo realizado sobre sistemas de colheita da cana-de-açúcar, onde foram comparados solos com sistema de queima da palhada e sistemas com colheita mecanizada, Oliveira (2014) observou que os componentes biológicos do solo foram constituídos pelos animais e vegetais no solo, juntamente com seus resíduos, que podem ser frescos ou em variados estados de decomposição. A matéria orgânica (MO) não viva, correspondeu a 98% do total de C orgânico do solo, enquanto a parte viva não passou de 4%.

Oliveira *et al.* (2014) observou que nos sistemas de manejo da colheita com queima e sem queima estudados, as variações de mineralização da matéria orgânica seguiram padrão sazonal, com maiores valores na estação chuvosa e menores na seca. No sistema de colheita sem a queima o padrão sazonal levou a diferença significativa nos resultados, na profundidade de 5-20 cm, maior no mês de maio em relação a agosto, uma vez que uma porção da palhada que se acumula no solo de um ciclo para o próximo ciclo se torna um substrato essencial para os organismos presentes no solo.

A análise do conjunto de dados evidencia que a prática de cultivo da cana-de-açúcar sem queima e com a deposição da palhada sobre o solo exerce um impacto positivo nos atributos biológicos resultando na melhoria da qualidade do solo e na redução de sua degradação (Oliveira et al., 2014).

Este padrão foi observado por Mendoza *et al.* (2000) com valores de 215 a 152 mg C kg⁻¹ e 303 a 195 mg C kg⁻¹ em três épocas.

Segundo Ronquim (2010), em solos de textura média ou arenosa, os teores de matéria orgânica tendem a ser mais baixos em comparação aos solos argilosos devido à menor capacidade de retenção de água e nutrientes desses solos. Enquanto em solos argilosos a matéria orgânica tende a estabilizar-se entre 25 a 30 g/dm³, em solos de textura média, esses valores geralmente estabilizam-se em torno de 15 a 20 g/dm³. Já em solos arenosos, os teores de matéria orgânica podem ser ainda mais baixos, estabilizando-se em valores na faixa de 10 a 15 g/dm³.

Essa diferença ocorre porque solos de textura arenosa possuem menor capacidade de formar agregados estáveis, o que dificulta a proteção da matéria orgânica contra a decomposição. Além disso, solos arenosos apresentam menor atividade biológica devido à sua baixa retenção de umidade, o que resulta em uma decomposição mais rápida da matéria orgânica, com menor acumulação ao longo do tempo.

Ronquim (2010), diz ainda que três situações são responsáveis por deixar um solo rico em matéria orgânica, ou ele está localizado em clima frio, ou localizado em grande altitude ou apresenta excesso de água, o que consequentemente é responsável por reduzir os teores de oxigênio no solo. Nessa situação, a atividade de microrganismos decompositores é inibida e a matéria orgânica se acumula.

Quando o solo se encontra em ambientes frios, de grande altitude ou com excesso de água, ocorre uma redução nos teores de oxigênio, o que afeta diretamente a atividade dos microrganismos decompositores aeróbios. Esses organismos, que dependem do oxigênio para realizar a decomposição da matéria orgânica, têm sua atividade inibida nessas condições, levando a um acúmulo de matéria orgânica no solo.

Em solos encharcados ou com excesso de água, por exemplo, o oxigênio presente nos poros do solo é rapidamente consumido, criando um ambiente anaeróbico, onde microrganismos aeróbios não conseguem se desenvolver adequadamente. Isso limita a decomposição da matéria orgânica, pois esses organismos são os principais responsáveis por quebrar os resíduos orgânicos de maneira eficiente. Sem a disponibilidade de oxigênio, o processo de decomposição é muito mais lento, e a matéria orgânica começa a se acumular (Silva; Moreira, 2006).

Além disso, em ambientes de baixas temperaturas, como em regiões de clima frio ou de grandes altitudes, o metabolismo dos microrganismos é naturalmente reduzido, pois as condições frias desaceleram a atividade biológica. Isso também contribui para o acúmulo de matéria orgânica, já que o processo de decomposição se torna menos eficiente (Paul; Clark, 1996).

Portanto, o acúmulo de matéria orgânica nesses solos ocorre devido à combinação de baixa disponibilidade de oxigênio e condições adversas que inibem a atividade dos microrganismos decompositores, o que impede a rápida degradação da matéria orgânica.

3 MANEJO DE SOLO

O manejo do solo pode ser definido como toda atividade aplicada ao sistema solo/ planta, assim, se o manejo for correto, mas as condições climáticas não favorecerem, não se alcança boa produtividade, evitando possíveis degradações ambientais, sendo então necessário conhecimentos sobre o clima e a cultura dentre os diversos manejos empregados nas áreas de cultivos agrícolas está o preparo do solo. Esse manejo vai além das ações que impactam na sua estrutura física, englobando também aspectos relacionados aos fatores que influenciam o pH e o ambiente. Esses elementos desempenham papel fundamental na promoção da absorção eficiente de nutrientes (Luchiari Júnior, 1987).

O ambiente de produção é a interação entre a planta, o solo, o clima e o manejo agrícola, sendo assim a partir dessa combinação, obtêm-se os

resultados que são usados para determinar as melhores indicações de variedades.

O manejo agrícola pode ser aplicado a todos os três fatores mencionados, mas o solo tem um impacto mais rápido em suas respostas, influenciando diretamente na produtividade. Desse modo, adequadas práticas de manejo do solo podem levar o aumento ou à diminuição da produtividade das culturas (Aquino *et al.*, 2015).

Aprimorar a permeabilidade do solo favorece a infiltração da água, desempenhando um papel crucial no controle da erosão, que representa a principal causa da degradação das terras agrícolas e, além disso, resulta na contaminação dos recursos hídricos (Tavares; Lima; Zonta, 2010).

3.1 Cultivo convencional

A fim de facilitar o crescimento das raízes das plantas, o preparo convencional do solo consiste no revolvimento de camadas superficiais, com o intuito de reduzir a compactação, incorporar corretivos e fertilizantes e aumentar os espaços porosos. Esses processos serão responsáveis por elevar a permeabilidade e o armazenamento de ar e água. Outro fator importante no revolvimento do solo, é que esse processo promove também o corte e incorporação de plantas daninhas, auxiliando no controle de pragas e patógenos do solo (Santiago; Rossetto, 2022).

Vale ressaltar que é de extrema importância utilizar corretamente as técnicas de preparo do solo uma vez que ao utilizadas de forma equivocada pode ser responsável por causar uma progressiva degradação física, química e biológica. Sendo assim, o preparo do solo tem por objetivo básico otimizar as condições de brotamento, emergência e estabelecimento das plantas, juntamente com uma boa infiltração de água, reduzindo possíveis erosões por enxurrada (Santiago; Rossetto, 2022).

Quando a cultura instalada é a cana-de-açúcar, primeiramente, recomenda-se realizar a destruição das soqueiras. Em seguida a primeira aração, durante a preparação do talhão, deve ser realizada de forma mais

profunda e com bastante antecedência ao plantio. Essa aração é responsável pela destruição das soqueiras anterior, de forma a auxiliar na incorporação e decomposição dos restos culturais existentes.

O manejo mais comum é realizar a dessecação, seguida por uma grade pesada para eliminar a matéria seca remanescente, onde em alguns casos podem ser utilizada a grade rotativa, ou conhecida como eliminador de soqueiras.

Outro fator que favorece a dessecação ao invés do uso de grade rotativa é que o plantio de cana-de-açúcar ocorre normalmente em março, portanto o solo está sendo preparada próximo a fevereiro, época de chuvas, portanto, ao passar a enxada rotativa e chover, favorece a brotação (Santiago; Rossetto, 2022).

Quando nos deparamos com a situação em que a cana-de-açúcar será cultivada pela primeira vez em determinada área (talhão), recomenda-se realizar uma aração profunda com considerável antecedência ao plantio, buscando por sua vez a destruição, incorporação e decomposição dos restos culturais existentes naquela área, para então realizar a gradagem (Santiago; Rossetto, 2022).

Quando comparado a sistemas de cultivo com baixo revolvimento, a preparação do solo promove sua aeração, expondo-o a fatores ambientais como temperatura, vento, sol, chuva, oxigênio, entre outros. Infelizmente, essa exposição acaba degradando o solo, tornando-o empobrecido em seus atributos físicos, químicos e biológicos.

Por outro lado, a adoção de cultivos com baixo revolvimento do solo pode melhorar suas propriedades. Persistir com um sistema conservacionista leva a uma maior disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo no solo. Um aspecto crucial é o aumento dos teores de matéria orgânica no solo, o que mantém uma maior capacidade de troca de cátions. Isso, por sua vez, garante um aporte mais eficiente de nutrientes para o solo, uma vez que esses processos estão intimamente relacionados (Coleti, 2009).

Muraro; Rossi Junior; Schogor (2011) cita que a utilização de adubação nitrogenada, combinada com a incorporação de resíduos culturais ao solo,

resultou em um aumento significativo na absorção total de nitrogênio pela planta de cana-de-açúcar. Além disso, a aplicação de fertilizante nitrogenado durante o plantio demonstrou promover o crescimento das raízes e a acumulação de nitrogênio no sistema radicular, destacando a importância dessa prática agrícola para otimizar a eficiência nutricional e o desempenho da cultura.

A substituição do cultivo convencional de cana-de-açúcar, que envolvia a prática de queima da palhada, pelo cultivo de eucalipto trouxe benefícios significativos para a qualidade do solo na região da Mata Atlântica de Alagoas. Esse tipo de mudança no uso da terra tem gerado impactos positivos, como o aumento nos teores e estoques de carbono e nitrogênio do solo, elementos essenciais para a fertilidade e sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas. A acumulação de carbono, em especial, tem uma função crucial no sequestro de CO₂ atmosférico, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Moraes *et al.*, 2014).

Além disso, a conversão para o cultivo de eucalipto resultou em uma redução na densidade do solo e no aumento da estabilidade dos agregados em água. A densidade do solo é um fator importante, pois influencia diretamente a aeração e a infiltração de água, bem como o desenvolvimento das raízes das plantas. Solos com menor densidade facilitam o crescimento das raízes e a movimentação da água no perfil do solo, melhorando a produtividade agrícola e a resiliência dos sistemas agrícolas (Carneiro *et al.*, 2009). O aumento da estabilidade dos agregados, por sua vez, reflete uma maior resistência à erosão, o que é crucial em regiões sujeitas a intensas chuvas, como a Mata Atlântica.

Esses resultados sugerem que a conversão para o cultivo de eucalipto pode ser uma alternativa viável para promover o sequestro de carbono, ao mesmo tempo em que melhora a qualidade do solo. No entanto, para garantir que essa prática seja sustentável a longo prazo, é fundamental realizar pesquisas mais aprofundadas que investiguem possíveis impactos negativos, como a redução da biodiversidade e o uso intensivo de insumos. Além disso, o manejo adequado das plantações de eucalipto é essencial para maximizar os benefícios e minimizar os efeitos adversos, como a potencial acidificação do solo.

ou a redução dos níveis de água disponível, em algumas condições específicas (Gonçalves *et al.*, 2013).

Portanto, embora os resultados iniciais sejam promissores, a substituição de culturas deve ser cuidadosamente monitorada e planejada para assegurar que os ganhos ambientais e econômicos sejam sustentáveis ao longo do tempo, garantindo a saúde dos ecossistemas e a viabilidade econômica da agricultura na região.

3.2 Cultivo mínimo

Sistema de Preparo Mínimo (SPM), também chamado de cultivo mínimo, consiste no método de preparo do solo que é recomendado para áreas onde não há evidência de forte compactação, problemas relacionados a barreiras químicas que demandariam calagem e gessagem, ou presença significativa de pragas do solo. Seria indicada, também, para áreas mais declivosas, onde os problemas de erosão são mais críticos. Essa técnica proporciona condições mais favoráveis de descompactação no sulco, permitindo um melhor desenvolvimento radicular das plantas. Além disso, torna o sulco mais raso, facilitando o processo de nivelamento da cana-planta e favorecendo a colheita mecanizada (Santiago; Rossetto, 2022).

O cultivo mínimo apresenta várias vantagens em relação ao cultivo tradicional, tais como a possibilidade de plantio em épocas chuvosas, permitindo antecipação do plantio em até alguns meses, a utilização mais intensa da área de plantio, devido ao menor intervalo entre a colheita e o replantio, a redução da erosão, contribuindo para a conservação do solo, a diminuição do uso de máquinas, implementos e combustível, resultando em economia de recursos e ainda eficiente controle de plantas daninhas, como a tiririca e a grama-seda, proporcionando melhor desenvolvimento das culturas.

Tavares; Lima; Zonta (2010), considerando a possível presença de um teor de umidade mais elevado no solo devido a práticas de cultivo mínimo, o fator principal que promove o aumento no comprimento dos entrenós é a preservação da cobertura vegetal do solo. Essa abordagem favoreceu a retenção de água no

solo até que a cobertura do dossel vegetativo se completasse, especialmente durante os períodos de escassez de chuva.

Ao manter a palhada na superfície, também é possível observar um aumento no padrão de perfilhamento durante as fases intermediária e final da cultura. Isso contrariou a suposta influência negativa da palhada no rebrote e ainda resultou em maior altura aos 357 dias após o plantio (DAP). O sistema de cultivo mínimo e o uso de Cana crua são práticas que favorecem o acúmulo de material orgânico no sistema, principalmente através das folhas e pontas, potencializando a incorporação desse material (Tavares; Lima; Zonta, 2010).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foi realizada uma análise aprofundada das complexidades associadas ao manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar, enfatizando a relevância de práticas agrícolas sustentáveis para otimizar tanto a produtividade quanto a conservação ambiental. A avaliação detalhada dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo proporcionou uma compreensão abrangente sobre como esses fatores interagem e afetam diretamente a saúde do solo e o desenvolvimento da cana-de-açúcar.

O estudo ressaltou a necessidade de equilibrar cuidadosamente o manejo do solo, destacando que diferentes práticas, como o cultivo mínimo e o manejo convencional, apresentam vantagens e desvantagens que devem ser analisadas em função das condições específicas do solo e do ambiente. O cultivo mínimo, que envolve a menor mobilização possível do solo, foi apresentado como uma técnica promissora para a preservação da estrutura do solo, favorecendo a retenção de umidade e a redução da erosão. No entanto, reconhece-se que sua eficácia depende das condições locais, como o tipo de solo, clima e o histórico de uso da terra. Já o manejo convencional, que inclui o uso intensivo de arados e outros equipamentos, pode ser mais apropriado em determinadas circunstâncias, mas também pode acelerar a degradação do solo se utilizado de forma inadequada.

Os resultados obtidos reforçam a ideia de que a adoção de práticas de manejo inovadoras, como a redução do revolvimento do solo, pode gerar melhorias substanciais na qualidade do solo, contribuindo para a sustentabilidade das plantações de cana-de-açúcar a longo prazo. Essas práticas são particularmente importantes em regiões onde o uso contínuo de métodos convencionais resultou em compactação e perda de matéria orgânica. O trabalho também destacou a relevância da adubação balanceada e da seleção criteriosa de cultivares, estratégias que se mostraram essenciais para o uso eficiente dos recursos naturais, garantindo uma produção agrícola mais sustentável e economicamente viável.

Para pesquisas futuras, sugere-se uma avaliação mais detalhada da viabilidade econômica de diferentes sistemas de manejo do solo, levando em consideração fatores como o custo-benefício das técnicas adotadas e o impacto sobre a produtividade a longo prazo. Além disso, o desenvolvimento de novas variedades de cana-de-açúcar que sejam mais resilientes às variações climáticas e mais adaptadas às condições edáficas específicas é uma área de grande potencial. Outro aspecto que merece maior investigação é o papel da biotecnologia e da engenharia genética na otimização das práticas agrícolas, especialmente no que diz respeito à melhoria da resistência das culturas a estresses bióticos e abióticos.

Este trabalho oferece uma contribuição significativa para a comunidade científica e para o setor agrícola, fornecendo diretrizes baseadas em evidências científicas que podem ser aplicadas no campo para aumentar a eficiência produtiva e promover a sustentabilidade ambiental. Dessa forma, beneficia não apenas os produtores de cana-de-açúcar, mas também toda a cadeia produtiva e a sociedade em geral, ao promover um modelo agrícola mais sustentável e equilibrado.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, A. R. **Outros produtos**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/outros-produtos>. Acesso em: 31 ago. 2023.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945-1962, 2004.
- AQUINO, G. S. DE et al.: AQUINO, G. S. de; MEDINA, C. de C.; PORTEIRA JUNIOR, A. L.; SANTOS, L. O.; CUNHA, A. C. B.; KUSSABA, D. A. O.; SANTOS JÚNIOR, J. H.; ALMEIDA, L. F.; SANTIAGO, A. D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 12, p. 1150–1159, 2015.
- BARROS, R. P. de; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R. A.; BARRETTO, M. C. V.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 3, p. 341-346, 2010.
- BASSO, L.C.; AMORIM, H.V.; OLIVEIRA, A.J. de; LOPES, M.L. Ethanol production in Brazil: the industrial process and its impact on yeast fermentation. *Biotechnology for Biofuels*, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2011.
- CARNEIRO, M. A. C. et al. Impacto de sistemas de manejo na densidade e porosidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 255-264, 2009.
- CARVALHO, L. A. de; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C. A.; CENTURION, J. F. Spatial variability of soil physical properties in two management systems in sugarcane crop. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 60–68, jan. 2012.
- CASTRO, A. M. C.; SILVA, A. P.; SANTOS, G.; LIMA, P. Avaliação de atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo de cana-de-açúcar. **Rev Agrar.**, v. 6, n. 22, p. 415–422, 2013.
- CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D.; CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 173, p. 64–74, 2017.
- CONAB. Boletim da Safra de Cana-de-açúcar; **Acompanhamento da Safra Brasileira - 3º Levantamento**. 11 2023. Disponível em:

https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/50386_66eb66936a5d73a592e5fb25bc9cb71b>. Acesso em: 15 dez. 2023.

CORTEZ, L.; MAGALHAES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, Campinas, v. 2, n. 2, p. 2-17, 1992. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/45/45/#:~:text=Os%20subprodutos%20mais%20importantes%20s%C3%A3o,foram%20desenvolvidos%20especialmente%20para%20isto>. Acesso em: 31 ago. 2023.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J.P.; CORREA, A.P.A; MARINHO, J.F.U.; FONTANETTI, C.S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752-2761, 2013.

CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. de A.; ROSSETTO, R.; SORATTO, R. P. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Fepaf, 2010.

D'AGOSTINI, S.; REBOUÇAS, M. M.; BATISTA FILHO, A.; VITIELLO, N. A cana-de-açúcar permeando pelo centro de memória do instituto biológico. **Revista Páginas do Instituto Biológico**, v. 5, n. 1, 2009.

DE OLIVEIRA FILHO, F. X. **Compactação de solo cultivado com cana-de-açúcar em Baía Formosa**, Rio Grande do Norte. Ceres, v. 63, n. 5, 2016.

DIAS, M.O.S.; MACIEL FILHO, R.; CUNHA, M. P.; ROSSELL, C. E. Vasconcellos; MACIEL, M. R. W. Cogeneration in integrated ethanol and sugar production plants in Brazil. **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3691-3699, 2011.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Madison: **Soil Science Society of America**, 1994. p. 3-21.

FAO. Global Framework on Water Scarcity in Agriculture: Achieving the SDGs. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2021.

GOLDEMBERG, J. The Brazilian biofuels industry. **Biotechnology for Biofuels**, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2008.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Eucalyptus forests: Environmental issues and sustainability. In: Sustainable Forest Management. Rijeka: IntechOpen, 2013. p. 1-27

IMPULSA COMUNICAÇÃO-IMPULSA.COM. BR. **Solos do Estado de São Paulo – IAC – 2014**. Disponível em: <https://solossp.iac.sp.gov.br/>. Acesso em: 8 mar. 2024.

LAVELLE, P.; SPAIN, A. V. **Soil ecology**. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2001.

LEAL, M. R. L. V. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use. **Sugar Tech**, v. 15, n. 2, p. 195-200, 2013.

LUCHIARI JÚNIOR, A. **Manejo do solo e aproveitamento de água. Solos dos cerrados**: tecnologias de estratégias de manejo. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 1987.

MAGALHÃES, Y. R.; COELHO, A. P.; FERNANDES, C.; DALRI, A. B. Irrigação por gotejamento subsuperficial em cultivares de cana-de-açúcar impactam a agregação do solo? **Irriga**, v. 1, n. 3, p. 431–445, 2021.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MENDONZA, H. N. S.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, L. A.; CEDDIA, M. B.; ANTUNES, M. V. M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 24, n. 1, p. 201–207, 2000.

MEDINA, J. **Cana-de-açúcar**: a potência do Brasil. [S.l.]: Agropos, c2022. Disponível em: <https://agropos.com.br/cana-de-acucar/>. Acesso em: 31 ago. 2023.

MORAES, C.; MONTEIRO, A. C.; MACHADO, A. C. R.; BARBOSA, J. C.; MOCHI, D. A. Production of a bioherbicide agent in liquid and solid medium and in a biphasic cultivation system. **Planta daninha**, v. 32, n. 2, p. 255–264, 2014.

MORAES, J. F. L. Sequestro de carbono no solo em áreas com diferentes usos da terra na Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 135-144, 2014.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006.

MUSSATTO, S. I.; ROBERTO, I. C. Alternatives for detoxification of diluted-acid lignocellulosic hydrolyzates for use in fermentative processes: A review. **Bioresource Technology**, v. 93, n. 1, p. 1-10, 2004.

OLIVEIRA, A. P. P. de; ZONTA, E.; SILVA, A. P.; SANTOS, G. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar: conhecimento atual sobre modificações em atributos de solos de tabuleiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 9, p. 939–947, set. 2014.

OLIVEIRA, A. M.; SILVA, J. C.; PEREIRA, L. F.; SANTOS, M. H. Avaliação do potencial da vinhaça como adubo orgânico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 280-285, 2014.

OLIVEIRA, M. W.; SOUZA, R. J.; ALMEIDA, F. C.; LIMA, J.P. Potencial de utilização da torta de filtro na fertilização de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 923-931, 2014.

PARAZZI, C.; SILVA, P. K.; LINS, L. P.; BERNARDO, M. Estudo da qualidade físico-química, tecnológica e sensorial de caldos de cana-de-açúcar para consumo. **Revista Ciência Tecnologia & Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 3–10, 2018.

RONQUIM, C. C. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**: Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para regiões tropicais. Campinas: Embrapa Territorial Monitoramento Por Satélite, 2020.

SÁ, M.A.C. de SANTOS JUNIOR, J.D.G. Gomes dos; FRANZ, C.A.B; Alberto Bento, A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1610–1622, 2016.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Preparo convencional - Portal Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao/preparo-do-solo/preparo-convencional>. Acesso em: 15 ago. 2023.

SANTIAGO, R. R. A.; ROSSETTO, R. **Cultivo mínimo - Portal Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao/preparo-do-solo/cultivo-minimo>. Acesso em: 15 nov. 2023.

SANTOS, P. R. dos. **Atributos do solo em função dos diferentes usos em perímetro irrigado do Sertão de Pernambuco**. 112f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Rural Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

SEGATO, S. V.; CLÁUDIA, F. M.; MATTIUZ, A. E. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 19–36.

SILVA, M. A.; PEREIRA, J. C.; OLIVEIRA, M.H.; SANTOS, L. F. Use of dry yeast from sugarcane ethanol fermentation in animal feed. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 4, p. 764-771, 2009.

SILVA, M. A.; PEREIRA, J. C.; OLIVEIRA, M.H.; SANTOS, L. F. Utilização de resíduos agroindustriais na adubação de culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Agricultura Sustentável**, v. 2, n. 1, p. 85-91, 2010.

SOUZA, G. S. de, SOUZA, Z.M. de; SILVA, R.B. da. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 135–146, 2014.

TAVARES, O.C. Huertas; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 61–68, 2010.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; SIMÕES NETO, D. E.; MELO, E. M. Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 21, n. 11, p. 752–757, 2017

TÓTOLA, M. R.; NEVES, J. C. L.; MENDONÇA, E. S. Microbiota do solo e sua contribuição para a qualidade do solo. In: ALVAREZ, V. V. H. et al. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. v. 9, p. 1-26.

VASCONCELOS, R. F. B. de; MENDONÇA, E. S.; CUNHA, T. J. F.; LIMA, P. C. Estabilidade de agregados de um latossolo amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 309–316, 2010.

VAZ, C. M. P.; PRIMAVESI, O; PATRIZZI, V.C.; IOSSI, M. de F. **Influência da umidade na resistência do solo medida com penetrômetro de impacto**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2002. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/46699>. Acesso em: 07 maio 2024.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campina Grande, v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009