

PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NA PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Nilza Patrícia Ramos, Cristiano Alberto de Andrade, Ana Paula Contador Packer, Osvaldo Machado Rodrigues Cabral, André May, Sergio de Oliveira Procópio, Raffaella Rossetto e Antonio Dias Santiago

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é um destaque na agricultura brasileira desde o período do descobrimento. Seu cultivo iniciou-se na Capitania de São Vicente, próximo ao ano de 1532, e a partir de 1580 colocou o Brasil como um dos protagonistas na produção de açúcar (Figueiredo, 2008). Na safra 2022, essa cultura ocupou cerca de 26,1 milhões de hectares (ha) no mundo, dos quais 10 milhões estavam no Brasil (FAOSTAT, 2023), contribuindo com 8,5% (104 bilhões de reais) do total do valor bruto da produção (VBP) de lavouras e pecuária nacional (Brasil, 2022). Essa representatividade se deve à diversificação de produtos ofertados, como açúcar, etanol, energia elétrica gerada na queima do bagaço e, em menor proporção, porém não menos importante, a cachaça, o melado, o uso para alimentação animal, bioplástico e outros compostos da sucroquímica e da química verde (Cherubini, 2010). O aproveitamento dos resíduos agrícolas e industriais, entre eles a palha, a vinhaça, a torta de filtro e as cinzas, também colocam a cadeia da cana numa posição de referência no que diz respeito à sustentabilidade do sistema (Rossetto et al., 2013) e economia circular.

O sucesso na produção e na ampla oferta de produtos é alavancado pelo uso, por parte do setor sucroenergético, de tecnologias agrícolas cada vez mais adaptadas às condições regionais/locais de cultivo. O desenvolvimento e a disponibilização de tecnologias avançadas para cana-de-açúcar se devem ao esforço contínuo de renomadas instituições de pesquisa, por exemplo o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), o extinto Instituto do Açúcar e Alcool (IAA), substituído na década de 1990 pela Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA), o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e, mais recentemente, à Embrapa, contando com o apoio do setor produtivo no financiamento e nas iniciativas de pesquisa.

As inovações tecnológicas disponibilizadas para a cultura, nas últimas décadas, cobrem uma diversidade de áreas e temas desde a obtenção de variedades com maior potencial de produção, maior teor de açúcar e com alguma tolerância aos estresses

bióticos a abióticos (Figueiredo, 2008), passando pelo mapeamento de solo, aprimoramento na recomendação de adubação, mecanização da colheita, com redução drástica da área queimada e dos impactos negativos dessa prática (Capaz et al., 2013). Também houveram avanços significativos no aproveitamento dos resíduos agroindustriais e no uso dos bioinsumos e na geração energética.

A preocupação com a sustentabilidade no sistema de produção canavieiro adquiriu relevância num período mais recente devido à ampliação da discussão sobre mudanças climáticas globais. A sociedade e economia estão mobilizadas nesta temática, incluindo a proposição de políticas públicas e ações mais específicas no setor agropecuário, para adaptação e mitigação do aquecimento global decorrente da interferência antrópica (Buendia et al, 2019). O foco exclusivo na produtividade e expansão da fronteira agrícola é agora ultrapassado. Os impactos ambientais e sociais fazem parte da governança das organizações e pautam também o desenvolvimento de uma nova agricultura, que alia produtividade, preservação, biodiversidade, economia circular, serviços ambientais, compromissos internos e externos de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), dentre outros aspectos.

Os compromissos firmados entre Brasil e Organização das Nações Unidas (ONU) para o alcance de objetivos de desenvolvimento sustentável - ODS (Madari et al., 2018) confirmam a importância da agricultura para a sustentabilidade global, assim como a tendência crescente de valorização e busca de boas práticas no setor agrícola. O setor canavieiro devido à produção de etanol, que é um biocombustível, destaca-se nesses compromissos e tem adotado boas práticas agrícolas e industriais em seus sistemas produtivos. A entrada em vigor da política RenovaBio, em 2018, constituiu importante incentivo para ações de sustentabilidade ambiental e econômica, premiando unidades produtoras com melhores notas de eficiência energético-ambiental (Brasil, 2017) e evitando emissões de GEE, com geração adicional de renda com a comercialização de cerca de 117 milhões de CBIOS (créditos de descarbonização) entre janeiro de 2020 a janeiro de 2024 (Agência Nacional do Petróleo, 2024).

A Embrapa Meio Ambiente, cuja missão é *Viabilizar soluções de PDE-I para promover uma agricultura sustentável e melhorar a qualidade ambiental em benefício da sociedade brasileira*, vem entregando resultados e inovação por meio das pesquisas com cana-de-açúcar. Este capítulo abordará algumas contribuições voltadas para o manejo sustentável da cana-de-açúcar, conforme uma sequência de práticas usadas ao longo das etapas do sistema de cultivo. São apresentadas práticas envolvendo método de propagação por meio de mudas pré-brotadas para implantação da cultura, seguindo para o manejo no período da reforma até efeitos do recolhimento parcial da palha na colheita sobre a planta e o ambiente.

PRÁTICAS DE PROPAGAÇÃO DA CANA

A disponibilidade de material propagativo com melhor sanidade, pureza e rastreabilidade é indispensável para o bom desempenho de um canavial (Landell et al., 2012). A ampliação dos materiais comerciais de cana ocorre essencialmente por multiplicação vegetativa, em que cada indivíduo se torna um clone da planta mãe, carregando suas características genéticas e fenotípicas (Casagrande; Vasconcelos, 2010). Havendo misturas de material propagativo, inevitavelmente o resultado será um canavial pouco homogêneo e de difícil manejo.

A forma preferencial e majoritária de multiplicação da cana-de-açúcar ainda ocorre com uso de toletes (colmos inteiros ou colmos fracionados a cada três ou quatro gemas), distribuídos manualmente ou mecanicamente sobre os sulcos de plantio. Entretanto, ao mesmo tempo que as máquinas aceleram o processo, elas aumentam os danos mecânicos nas gemas, exigindo maior consumo de material propagativo (acima de 20 t de colmos por hectare plantado), o que onera significativamente o custo de produção (Robothan; Chapell, 2002). Estão em estudo alternativas para sanar parte desse problema, uma das promissoras é a muda pré-brotada (MPB), que foi desenvolvida e vem sendo incentivada pela equipe do Centro de Cana do IAC (Xavier et al., 2014). A técnica em si foi baseada em trabalhos de Ramaiah et al. (1977), que demonstraram possibilidades de eliminação dos entrenós dos toletes de cana, utilizando apenas as gemas individualizadas associadas à pequenas partes do tolete, denominadas minirebolo ou minitolete (Figuras 1.1A e 1.1B).



Figura 1.1. Imagens de minitoletes ou minirebols: (A) e (B); gema individualizada (C) para uso na produção de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar.

Fotos: Nilza Patrícia Ramos

Uma adaptação à técnica de produção do MPB envolve a substituição do uso dos minirebols por gemas individualizadas de cana (Figura 1.1C), retiradas manual ou mecanicamente. Com essa inovação, utiliza-se apenas uma gema com primórdios radiculares conjugados, em uma estrutura cilíndrica com 7 a 18 milímetros (mm) de raio a partir do centro da gema, sendo que a estrutura radicular originará os primórdios radiculares da futura plântula (May; Ramos, 2019). Isso economiza material propa-

gativo, espaço e substrato, além de permitir o uso das estruturas sobressalentes do colmo para processamento industrial ou reaproveitamento da composição de fertilizantes organominerais, contribuindo com a otimização de rendimentos por unidade produtiva e com a economia circular.

A taxa de emergência a partir de gemas individualizadas com dimensão menor do que 14,5 mm e minirebolos não difere estatisticamente entre si, variando entre 78–85% (May; Ramos, 2019), o que é aceitável e desejável durante a produção de MPB. Uma vantagem adicional é a facilidade de automação completa da extração das gemas, o que otimiza o processo e permite a economia no volume de substrato necessário. Isso porque, além do uso de tubetes de 180 centímetro cúbicos (cm³) - comum para mini-rebolos -, também podem ser utilizadas bandejas plásticas ou de isopor, contendo 200 células com 18 cm³ de volume. A opção por bandejas de células ou tubetes dependerá do interesse e nível tecnológico do produtor, uma vez que as bandejas exigem maior atenção com a irrigação, por exemplo, mas, por outro lado, permitem a entrega da muda a partir de 45 dias, o que leva à economia de até 15 dias, desde que respeitadas as exigências do manejo.

O uso de MPB permite também que outras tecnologias possam ser adotadas, como inoculantes biológicos com potencial de tolerância ao estresse hídrico e promoção de crescimento (May et al., 2019, 2021). Esta é uma tecnologia que se alinha totalmente ao grande desafio da agricultura atual, que é a adaptação às mudanças climáticas, em que se incluem veranicos intensos (Naser; Shani, 2016). Sabe-se que a associação entre plantas e microrganismos pode trazer grandes benefícios e um deles é a tolerância ao estresse hídrico (Grover et al., 2013), já obtido na associação entre *Bacillus aryabhattai* e soja (Park et al., 2017), milho (Kavamura et al., 2013) e, mais recentemente, cana (May et al., 2019).

Os benefícios podem mudar conforme a variedade de cana, com alguns grupos responsivos e outros nem tanto (Stancate et al., 2015). Algumas respostas positivas são importantes perante o desafio de buscar práticas de manejo eficientes para proteger as plantas de cana do estresse hídrico que não exijam aumentos no consumo de água por irrigação, principalmente, nos períodos de implantação da cultura em campo e mais ainda com o uso de MPB.

São visíveis os efeitos benéficos no desenvolvimento da parte aérea e no sistema radicular de MPB de cana da variedade IAC 91–1099 inoculada com *Bacillus aryabhattai* (Figura 1.2). Houve aumento de 58% e 123%, respectivamente, na massa seca de parte aérea e de raízes de plantas (60 dias) inoculadas em relação às não inoculadas, após regimes de irrigação que simulavam estresse hídrico (May et al., 2019).



Fotos: André May

Figura 1.2. Imagem da parte aérea (A) e das raízes (B e C) de plantas de cana-de-açúcar, variedade IAC 91-1099 inoculadas com *Bacillus aryabhattai* e não inoculadas, com uso de regime de uma lâmina de irrigação a cada sete dias (A e B) e 21 dias (C).

O fato do *Bacillus aryabhattai* ter sido prospectado no bioma da Caatinga lhe confere tolerância às condições ambientais extremas e grande capacidade de desenvolvimento em distintos habitats (Kavamura et al., 2013), com destaque maior para a proteção ao sistema radicular das plantas, o que se confirmou também na cana (Figura 1.3) submetida a interrupções de irrigação por até 21 dias (May et al., 2019).

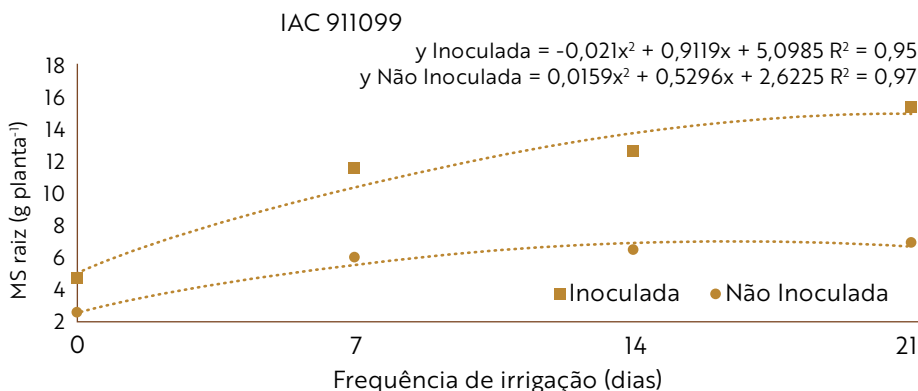


Figura 1.3. Massa seca de raízes de plantas de cana-de-açúcar, variedade IAC 91-1099 inoculadas com *Bacillus aryabhattai* e não inoculadas, com uso de regime de diferentes frequências de irrigação (May et al., 2019)

Cabe destacar que o sucesso no uso do inoculante ocorreu na fase de implantação da cultura, em condições controladas e que os estudos continuam, com o intuito de verificar qual sua ação e longevidade em campo. Isso porque, em condições de campo, há maior pressão da comunidade microbiana já instalada no solo, além de outros fatores que podem alterar seu comportamento e sucesso.

O uso de inoculantes biológicos em plantas para promoção de crescimento e aumento da tolerância de plantas a estresses abióticos (seca) é uma linha de pesquisa

da Embrapa Meio Ambiente que pode contribuir, significativamente, com o aumento da sustentabilidade em sistemas agrícolas. Logicamente, que as interações entre plantas e microrganismos são complexas e dinâmicas e, portanto, os resultados podem se alterar a depender do material genético e mesmo do ambiente, mas já é um passo rumo à necessidade atual de adaptações às mudanças climáticas. Mais informações sobre inoculantes biológicos são tratados nos Capítulos 16, 17 e 19 deste livro.

PREPARO DO SOLO NA REFORMA DA CANA

As preocupações com os métodos de propagação e com o material genético utilizados na implantação de uma área de cana-de-açúcar são parte importante no sucesso produtivo, mas não exclusivas. Há necessidade de um bom preparo da área de implantação, garantindo que grande parte das condições ideais necessárias para o crescimento da cultura sejam alcançadas. Isso porque, ao longo do seu ciclo, a cana passa por um declínio produtivo promovido, em grande parte, pelo aumento das falhas de plantas e degradação de atributos químicos e físicos do solo (Otto et al., 2011; Cury et al., 2014).

Um bom preparo não é sinônimo de mobilização intensa e profunda do solo. Isso já foi verdade absoluta para o setor canavieiro, porém o paradigma foi quebrado com a divulgação de informações de sucesso no uso de preparo reduzido e, até mesmo, no plantio direto (Tavares et al., 2010; Carvalho et al., 2017). Logicamente, a adoção de uma prática mais convencional ou de uma prática mais conservacionista dependerá das condições encontradas na área; de uma avaliação cuidadosa e local, que permita a adoção do mínimo de revolvimento, com economia de recursos e ganhos ambientais.

Num estudo conduzido por cinco cortes na Usina Açucareira Guaíra (Guaíra, SP) em Latossolo argiloso (63%) não foram encontradas diferenças significativas na produtividade de cana (TCH) e na produção de açúcar (Figura 1.4) em função do tipo de preparo do solo adotado na reforma do canavial. Mesmo no período de plantação da cana, que enfrentou uma seca atípica no ano de 2014 e, consequentemente, esperavam-se diferenças entre tratamentos, as produtividades foram semelhantes e se mantiveram ao longo das quatro socas, chegando ao acumulado médio de 439 t ha⁻¹ e média anual de 88 t ha⁻¹, valor bem acima da média nacional, que é de 77 t ha⁻¹, considerando-se as últimas cinco safras para São Paulo (Conab, 2021). Como a produtividade se manteve acima da média, mesmo na quarta soca, entendeu-se que não havia restrições químicas e físicas de solo e que o preparo reduzido e até mesmo o não preparo/plantio direto poderiam ser recomendados para a área.

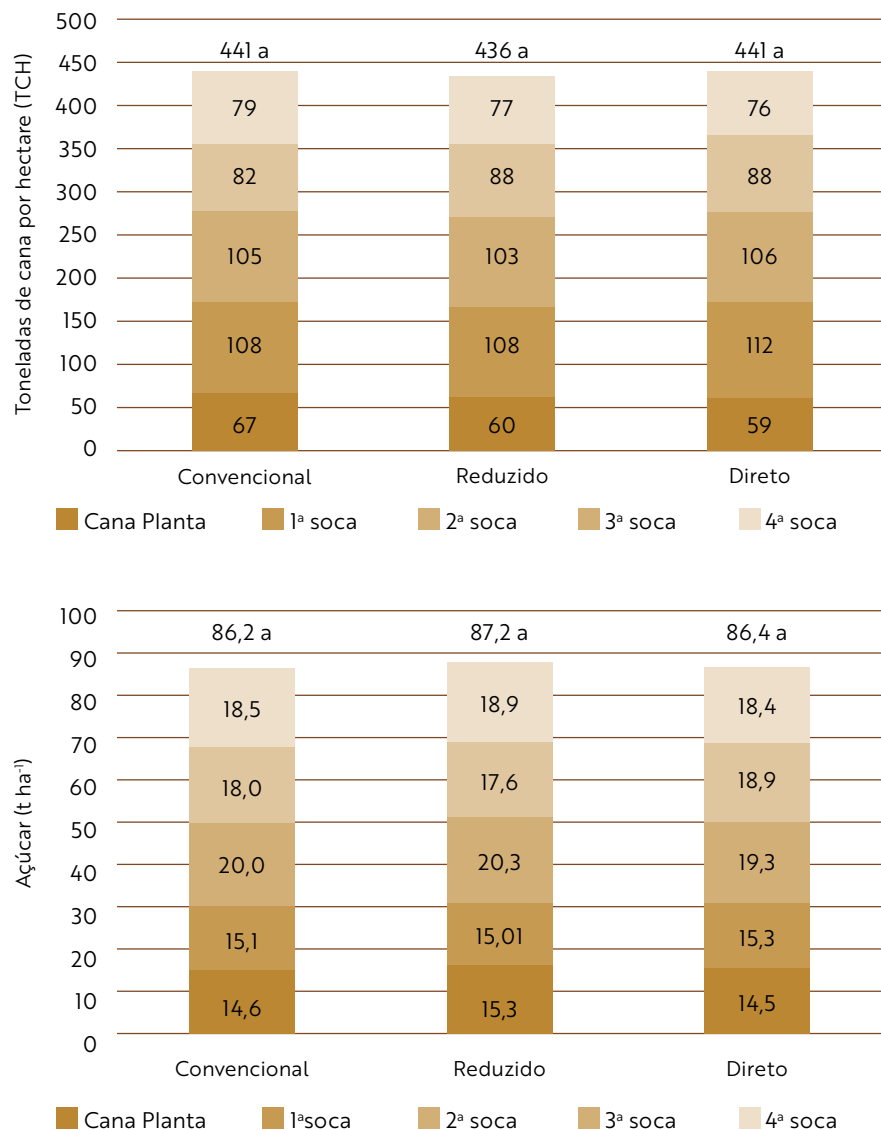


Figura 1.4. Produtividade de colmos (TCH) e rendimento de açúcar (t ha⁻¹) obtidos em canavial preparado com uso de práticas convencionais, reduzida e em plantio direto, em experimento conduzido na Usina Açucareira Guaira (Guaira, SP) entre os anos de 2013–2019.

Destaca-se que, essa informação se soma a outras favoráveis ao uso do preparo reduzido e plantio direto em cana, já relatadas na literatura, com o diferencial de ter avaliado a longevidade dos efeitos do preparo do solo no ciclo do canavial. Entende-se que esse adicional traz maior confiança ao produtor na tomada de decisão sobre seu uso em campo.

Paralelamente às avaliações de produtividade comparativa entre os sistemas de preparo do solo, foram quantificadas as emissões de GEE, como forma de se verificar impactos ambientais (Figura 1.5). O acompanhamento das emissões, nos primeiros 45 dias após a implementação da cultura da cana-de-açúcar, mostrou que o sistema com uso de preparo reduzido do solo e o sistema em que não há revolvimento, apenas plantio (plantio direto), emitem, respectivamente, 20% e 14% menos dióxido de carbono (CO_2) em relação ao sistema com preparo convencional (Figura 1.5A), corroborando com pesquisas anteriores que afirmam que a movimentação intensa e profunda do solo leva à destruição de seus agregados e consequente exposição de parte da matéria orgânica a ação oxidativa a cargo dos microrganismos do solo (De Luca et al., 2008), resultando na liberação de carbono na forma de CO_2 (La Scala et al., 2006).

Um tratamento adicional, em que a prática do plantio direto foi associada com a aplicação das bactérias fixadoras de nitrogênio (FBN) sobre os toletes (mudas) da cana também foi estudado, e trouxe emissões de CO_2 33% menores que as observadas no preparo convencional, sem uso de FBN (Figura 1.5A). Entretanto, a associação da FBN com o plantio direto promoveu emissões 10%, 30% e 55% maiores de óxido nitroso - N_2O , em relação ao preparo convencional, reduzido e direto sem FBN, respectivamente (Figura 1.5B). O N_2O é um gás emitido em quantidades significativamente menores que as de CO_2 , mas com poder poluente 298 vezes maior. Essa contribuição de N_2O não foi expressiva o suficiente para neutralizar os benefícios da associação das práticas de plantio direto (PD) e FBN, em termos de CO_2 , conforme mostra a Figura 1.5C. Assim, é possível inferir que as práticas conservacionistas podem minimizar os efeitos negativos das atividades agrícolas, que naturalmente são emissoras de GEE. Nesse sentido, ao se multiplicar as emissões evitadas (Figura 1.5) pela área de reforma de cana no estado de São Paulo, que foi de, aproximadamente, 567 mil ha ano em 2021 (Conab, 2022), teria emissões evitadas de 380 e 220 mil toneladas de CO_2eq com a opção pelo PD com FBN e sem FBN, respectivamente. No caso do plantio reduzido, as emissões evitadas estão na faixa de 150 mil toneladas de CO_2eq .

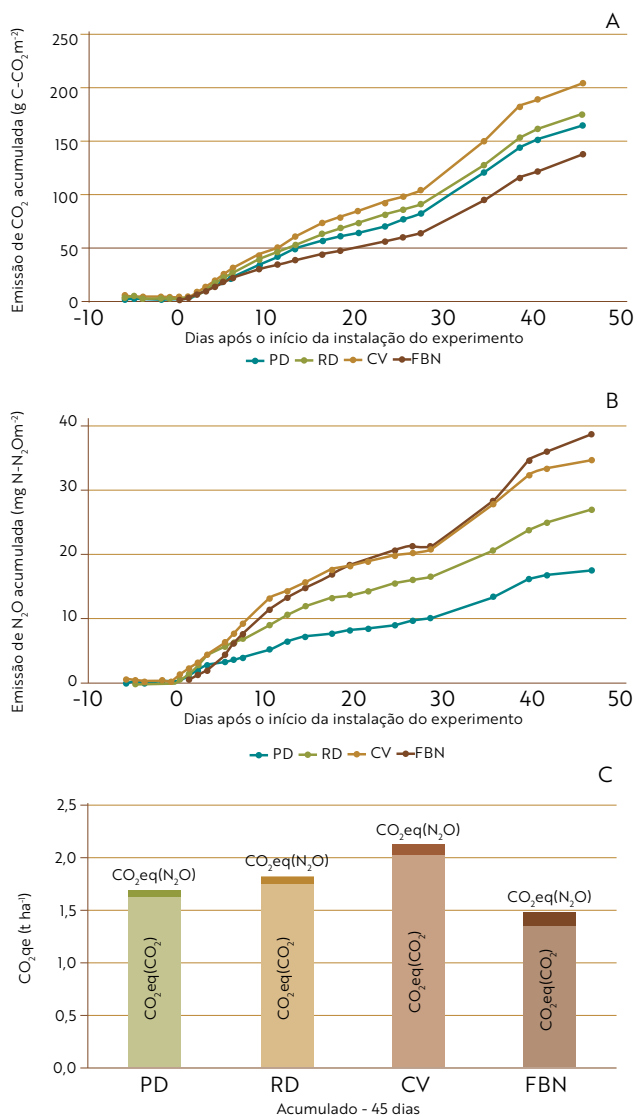


Figura 1.5. Emissões de CO_2 e N_2O oriundas do preparo do solo na reforma do canavial, com o uso de práticas convencionais, reduzida e em plantio direto. As emissões acumuladas de (A) dióxido de carbono (CO_2) em $\text{g C-CO}_2 \text{ m}^{-2}$ e de (B) óxido nitroso (N_2O) em $\text{mg N-N}_2\text{O m}^{-2}$ e a (C) soma de ambos transformados em CO_2eq medidas nos 45 dias após a instalação do experimento. Experimento conduzido na Usina Açucareira Guaira (Guaira, SP) entre os anos de 2013–2019.

Emissões de carbono na forma de CO_2 na reforma do canavial são importantes no balanço de carbono do sistema de produção de cana (La Scala et al., 2006) e determinam em parte o potencial da cultura e de seus produtos na mitigação das mudanças climáticas globais. Como forma de quantificar o impacto da reforma na emissão de CO_2 ou perda de C do solo, Cabral et al (2016) conduziram uma pesquisa em área de reforma de cana-de-açúcar, na Fazenda da Aeronáutica em Pirassununga, SP (Latossolo Vermelho com 75% de argila), para quantificar essas emissões a partir do preparo convencional (destruição de soqueira, duas arações profundas com aiveca e duas gradagens niveladoras). A análise dos fluxos contínuos de CO_2 por 42 dias (Figura 1.6), usando o sistema de correlação de vórtices, com equipamento EC150 Campbell Sci., Logan UT-USA, quantificou a emissão de 607,6 gramas (g) de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2}$ ($6,08 \text{ t ha}^{-1}$ de CO_2) ou $165,7 \text{ g de C m}^{-2}$ ($1,66 \text{ t ha}^{-1}$ de C). Esse valor corresponderia à redução de 4% no estoque de carbono do solo, considerando a camada 0–20 ($41,42 \text{ t ha}^{-1}$ de C no solo) (Cabral et al., 2016). A menor mobilização do solo teria, portanto, potencial para redução dessas emissões na reforma do canavial, o que significa C que permanece no solo, sendo agregado pelo processo de sequestro de C, assim como um desempenho ambiental mais favorável da cultura e de seus produtos.

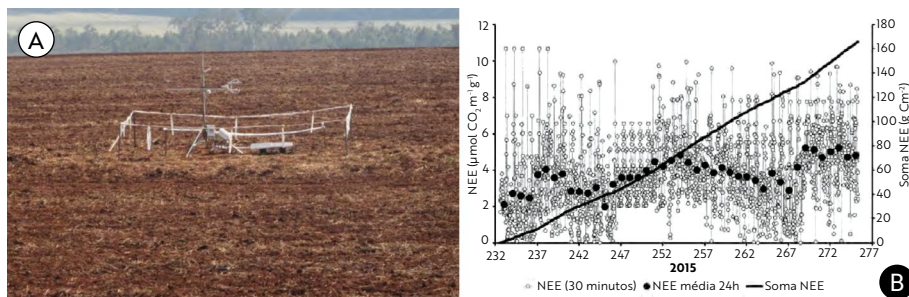


Figura 1.6. Imagem da área de reforma para uso em cana-de-açúcar com equipamento para quantificação de CO_2 (A) e séries temporais de fluxos CO_2 (30 minutos e média de 24 horas) entre o solo e atmosfera (NEE) e soma ao longo de 42 dias de observações Cabral et al (2016)

Fonte: Cabral et al (2016)

A escolha mais adequada de preparo a ser adotada dependerá das condições da área de reforma. Áreas com compactação grave e que restringe o desenvolvimento do sistema radicular da cana, com incidência generalizada de pragas como *Sphenophorus levi*, *Castnia licus* e outras limitações por fatores bióticas e abióticas podem conduzir a adoção de sistemas com mobilização mecânica mais intensa do solo. Em outras situações, porém, sistemas mais conservacionistas devem ser preferidos.

Cabe destacar que nos demais casos, em que inexistem limitações críticas, a recomendação é de uso de práticas conservacionistas. Há desempenho produtivo

de colmos e retorno de açúcar semelhantes aos dos métodos tradicionais, com o benefício ambiental de evitar a perda do carbono estocado no solo, durante os anos de uso de cana-crua. Até o presente momento, este benefício ainda não é capitalizado pelo produtor rural, mas a expectativa é de que não demore a acontecer, frente à todas as iniciativas de valorização de culturas com baixas emissões, onde se inclui o Programa ABC+¹ do Ministério da Agricultura e a política do RenovaBio do Ministério de Minas e Energia.

PRÁTICAS DE USO DAS LEGUMINOSAS NA REFORMA DA CANA

A ocupação da área com outras culturas no período da reforma apresenta caráter estratégico do ponto de vista da sustentabilidade do sistema de produção da cana-de-açúcar. Leguminosas de cobertura, também denominadas por adubos verdes, compõem um dos grupos preferenciais de espécies vegetais para serem cultivadas nesse período. Os fatores dessa escolha envolvem: incorporação de nitrogênio (N) orgânico ao solo, reduzindo a necessidade de utilização de fertilizantes químicos nitrogenados (Perin et al., 2004); aporte de biomassa vegetal ao solo (Resende et al., 2000); ciclagem de nutrientes (Silva et al., 2002); manutenção do teor de água do solo (Pereira et al., 2017); qualidade/estabilização do carbono orgânico do solo (Coelho et al., 2013); auxílio na qualidade física de solos compactados (Foloni et al., 2006); proteção física contra erosão (Alvarenga et al., 1995); supressão de plantas daninhas (Favero et al., 2001); e consequente aumento da produtividade da cana-planta cultivada em sucessão (Ambrosano et al., 2011).

Por outro lado, o período da reforma também se presta para a produção comercial de grãos, destacando-se, no Estado de São Paulo, as culturas do amendoim e mais recentemente da soja, que também são leguminosas. A disponibilização de cultivares de soja de ciclo mais curto, denominadas de superprecoces, aliado ao fator mercadológico positivo da cultura, vêm impulsionando o cultivo de soja no período da reforma dos canaviais paulistas. Lavouras de soja de alto potencial produtivo podem ser observadas em diversas áreas de renovação de canaviais, inclusive cultivadas no sistema de Meiosi (Figura 1.7). Diante desse cenário, os produtores precisam optar entre investir na melhoria da qualidade do solo, preferindo os adubos verdes, ou em cultivos comerciais, como a soja, que traz retorno econômico imediato, mas pode contribuir com menos benefícios agrônômicos ao canavial subsequente.

¹ Plano ABC. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc>

Fotos: Sérgio de Oliveira Procópio



Figura 1.7. Soja de alto potencial produtivo cultivada no período da reforma do canavial no sistema de meiosi.

As espécies *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria breviflora* e *Cajanus cajan* (guandu-anão) estão entre os adubos verdes mais cultivados na reforma dos canaviais (Figura 1.8). Na Tabela 1.1 observam-se valores de biomassa e quantidades de nitrogênio e carbono que essas espécies podem disponibilizar em sistemas agrícolas. Esses resultados compõem uma pesquisa conduzida entre novembro de 2020 e fevereiro de 2021, em uma área comercial de cana-de-açúcar (Agrícola Trevizoli) localizada no município de Taquaritinga, SP, cujo perfil é, sobretudo, Argissolo, com 12% de argila na camada de 0–20 cm. Diferenças significativas entre as espécies foram observadas para: biomassa fresca/seca produzida, nitrogênio e carbono disponibilizados ao solo e relação C:N dos materiais. Essas informações são relevantes para a definição/escolha da(s) leguminosa(s) mais adequada(s) a serem introduzidas no sistema de produção da cana-de-açúcar.

Se o objetivo for a incorporação de nitrogênio ao sistema, as espécies com maior destaque, nas condições experimentais, foram *C. spectabilis*, guandu-anão e *C. juncea*, contribuindo com valores entre 240 e 316 kg ha⁻¹ de N ao solo. Os aportes de carbono também foram expressivos, com valores variando entre 3.675 kg ha⁻¹ de C fornecido pela *C. breviflora* a 6.796 kg ha⁻¹ de C pela *C. juncea*, o que pode contribuir com a recuperação do carbono perdido no preparo do solo. Considerando um aporte de C via biomassa de adubo verde igual a 5.000 kg ha⁻¹ e relação C/N de 20/1, pode-se pesar numa mineralização de 83 kg ha⁻¹ de N (disponibilizado para a cana-de-açúcar), suficiente para alcançar uma relação C/N da biomassa em decomposição de 30/1. A partir desse ponto, 2/3 do C serão emitidos como C-CO₂ (3.350 kg ha⁻¹) e 1/3 incorporado como C no solo (1.650 kg ha⁻¹). É importante perceber, que além de fornecer N para a cultura da cana, o potencial para sequestro de C praticamente anula os 1.657 kg ha⁻¹ de C-CO₂ perdido na reforma do canavial (Cabral et al., 2016). Caso não seja usado o adubo verde, cultivando-se novamente cana-de-açúcar, com taxas de sequestro de C entre 1.020 e 1.870 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (La Scala et al., 2012), seria necessário, praticamente, um corte da cana para recuperar o C perdido na reforma.



Fotos: Sérgio de Oliveira Procópio

Figura 1.8. *Crotalaria spectabilis* (A), *Crotalaria juncea* (B), *Crotalaria breviflora* (C), *Cajanus cajan* (guandú-anão) e (D) cultivados em áreas de reforma de canaviais.

O consórcio de adubos verdes (Figura 1.9) é uma alternativa de cultivo ainda pouco explorada. De forma geral tem-se a ideia de que a diversificação de culturas leva a melhorias dos diferentes componentes ambientais (solo, água e biodiversidade de organismos) de um sistema agrícola (Franchini et al., 2011). Entretanto, isso não se confirmou quanto à disponibilidade de biomassa, nitrogênio e carbono proveniente de consórcios entre leguminosas (Tabela 1.1). A biomassa gerada pela quantidade de N e C foi inferior à observada durante o cultivo solteiro da maioria das espécies envolvidas no consórcio. Com isso, constata-se que esse aumento da diversidade biológica com o uso de consórcios de leguminosas pode não trazer benefícios adicionais que justifiquem a dificuldade operacional do plantio simultâneo de duas espécies.

Tabela 1.1. Contribuições em biomassa fresca, seca, nitrogênio e carbono de diferentes leguminosas, no período do florescimento, cultivadas em área de reforma de canavial em meiosi, em Argissolo. Taquaritinga, SP.

Espécie	Biomassa (kg ha ⁻¹)	Massa seca (kg ha ⁻¹)	Qtde de N (kg ha ⁻¹)	Qtde de C (kg ha ⁻¹)	Relação C:N
<i>Crotalaria spectabilis</i> ¹	56.600 ^{a2}	12.367 ^a	316 ^a	5.794 ^a	19c
<i>Cajanus cajan</i> (guandu)	37.100b	12.600 ^a	258ab	6.413 ^a	25ab
<i>Crotalaria juncea</i>	40.683b	13.717 ^a	240ab	6.796 ^a	30 ^a
<i>Crotalaria breviflora</i>	37.883b	7.583b	220ab	3.675b	17c
<i>Dolichos lablab</i> (Lablab)	39.733b	8.017b	209b	3.847b	19c
<i>C.spectabilis</i> + <i>C.breviflora</i>	36.367b	7.417b	194b	3.521b	18c
<i>Guandu</i> + <i>Lablab</i>	30.518b	7.016b	168b	3.459b	20bc
C.V.	21%	19%	22%	19%	15%

¹Leguminosas semeadas no espaçamento entrelinhas de 50 cm. ² densidade de plantio das leguminosas seguiu recomendações comerciais, sendo: 32 sem m⁻¹ para *C. spectabilis*; 15 sem m⁻¹ para guandu-anão; 15 sem m⁻¹ para *C. juncea*; 32 sem m⁻¹ para *C. breviflora*; 15 sem m⁻¹ para *Lablab*; 32 sem m⁻¹ para mix *C.spectabilis* + *C.breviflora* e 15 sem m⁻¹ para mix *Guandu* + *Lablab*;

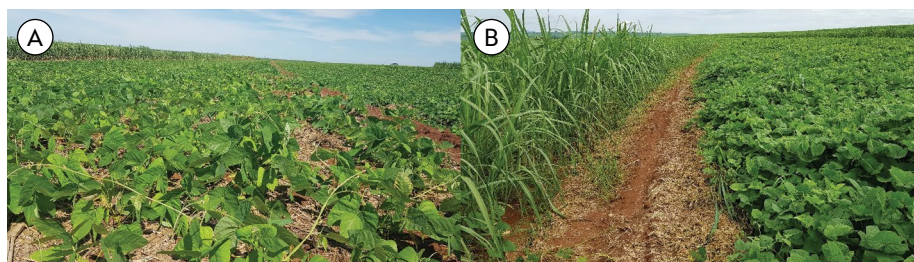
²médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey - 1%)



Figura 1.9. Consórcio entre *Crotalaria spectabilis* (A) e *Crotalaria breviflora* (B) em áreas de reforma de canaviais.

Considerando-se a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, percebe-se que a recuperação do carbono perdido em qualquer etapa da produção exigirá um grande esforço de recuperação, com incorporações lentas. Assim, todas as práticas que contribuam para esse retorno e fixação de carbono e nitrogênio devem ser incentivadas e valorizadas. O uso dos adubos verdes no período de reforma é uma dessas práticas e deve ser incentivada sempre que possível.

Leguminosas de hábito trepador como a mucuna-cinza (*Mucuna pruriens*) e o lablab (*Dolichos lablab*) (Figura 1.10) devem ser utilizadas com cautela, ou mesmo evitadas, pois podem se tornar problemas na área de cultivo, caso não sejam manejadas antes de produzirem sementes. Esse fato é exemplificado pela elevada infestação de mucuna-preta em canaviais, em que uma espécie introduzida com a finalidade de ser um adubo verde vem se transformando em uma planta daninha de alta complexidade.



Fotos: Sérgio de Oliveira Procópio

Figura 1.10. Mucuna-cinza (*Mucuna pruriens*) (A) e lablab (*Dolichos lablab*) (B) cultivados em áreas de reforma de canaviais no sistema de meiosi.

A mucuna-preta pode ser tornar uma planta invasora não apenas durante o cultivo da cana-de-açúcar, mas também no período da reforma do canavial, principalmente, quando a espécie escolhida apresenta crescimento lento e dificuldade de ocupação do ambiente, como é o caso da *Crotalaria breviflora* (Figura 1.11).



Fotos: Sérgio de Oliveira Procópio

Figura 1.11. (A) Infestação de mucuna-preta em área de reforma de cana-de-açúcar devido ao crescimento lento e a baixa taxa de ocupação de espaço propiciado pela *Crotalaria breviflora*. (B) Comparativo do crescimento/porte da *Crotalaria breviflora* com a *Crotalaria juncea*, semeadas no mesmo dia.

Alguns herbicidas utilizados na cultura da cana-de-açúcar deixam resíduos no solo capazes de afetar o crescimento/desenvolvimento das leguminosas cultivadas no período da reforma do canavial. Entre esses herbicidas, destacam-se o picloram (resíduos no solo ativos por até três anos após a aplicação), o tebuthiuron e o indaziflam (resíduos no solo ativos por até dois anos após a aplicação) e o amicarbazone (resíduos no solo ativos por até um ano após a aplicação). Esses períodos residuais podem ser alterados pela dose do herbicida, características do solo e condições ambientais. Desse modo, o uso de herbicidas nos últimos cortes da cana-de-açúcar deve ser um aspecto relevante no planejamento agrícola quando se objetiva a utilização de leguminosas no sistema de produção.

MANEJO DA SOCA CONSIDERANDO O RECOLHIMENTO PARCIAL DA PALHA

A colheita mecanizada da cana-crua, impulsionada por pressões ambientais e sociais para encerramento da queima para a colheita, trouxe consigo a possibilidade de manutenção do resíduo cultural sobre o solo, isto é, a palha. Essa mudança tecnológica foi um marco no setor canavieiro fortemente impulsionada pela assinatura do Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético no estado de São Paulo em 2007 (acordo voluntário entre o governo e o setor sucroenergético para o encerramento antecipado da queima para colheita da cana-de-açúcar). Sendo assim, até a safra de 2016, a taxa de uso de mecanização na colheita da cana no Brasil foi de 92% (Conab, 2017) e para São Paulo, na safra 2020, foi de 99% (União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia, 2021).

A palha foi adicionada ao conjunto de produtos explorados pelo setor sucroenergético devido ao seu potencial de aproveitamento para bioeletricidade ou mesmo na produção de etanol de segunda geração pelo uso da lignocelulose (Santos et al., 2012). Esse último uso ainda enfrenta desafios quanto à sua viabilidade econômica, mas é uma tecnologia a ser considerada diante da necessidade de aumento na disponibilidade de fontes alternativas de energia para o país. Logo, o recolhimento da palha do campo passou a ser alvo de interesse econômico e trouxe à luz a necessidade de entendimento a respeito dos efeitos que a retirada poderia trazer ao sistema solo-planta. Isso porque, a manutenção da palha, que ocorre na ordem de 10–20 t ha⁻¹ na base seca, a depender da variedade plantada, da produtividade local e das condições edafoclimáticas (Leal et al., 2013) pode trazer benefícios como a redução nos níveis de erosão, o aumento na infiltração e no armazenamento de água, e a mineralização de nutrientes pela ciclagem, além do aumento nos estoques de carbono do solo (Peres et al., 2010; Cerri et al., 2011; Sousa et al., 2012; Trivelin et al., 2013). Por outro lado, também pode favorecer a incidência de pragas como a cigarrinha (Dorneles Jr. et al., 2015) e o *Sphenophorus levis* e prejudicar a brotação durante o inverno em áreas com temperaturas mais frias.

Vários grupos de pesquisa se debruçaram acerca do tema e a equipe da Embrapa Meio Ambiente também se dedicou a entender “quais os impactos da retirada parcial da palha sobre os rendimentos de colmos e sobre a sustentabilidade”. Nesse sentido, pesquisas foram conduzidas (Figura 1.12) e parte dos resultados compilados podem ser observados na Tabela 1.2, com informações quanto à produtividade de colmos para localidades distintas, variedades de cana, épocas de colheita e quantidades de palha retiradas após a colheita.



Figura 1.12. Imagens da colheita mecanizada com recolhimento simultâneo da palha, usando regulagens dos ventiladores do extrator primário e secundário e das áreas com manutenção total e retirada total da palha após a colheita.

Uma informação valiosa obtida foi a taxa média de palha gerada por TCH, que ficou em 16%, considerando a média dos valores máximos de palha e suas respectivas produtividades baseados no compilado da Tabela 1.2. Menandro et al. (2017) observaram uma taxa de 12% para um conjunto de experimentos com remoção de palha, mas usando variedades diferentes das estudadas na Tabela 1.2; indicando o efeito de genótipos nessa característica. Já com relação aos impactos da retirada da palha sobre o TCH, verificou-se diferenças de resposta entre locais. Naqueles com maiores déficit hídricos e solos argilosos, como Guaíra, com clima tipo *Aw* (tropical de savana segundo classificação de Köppen), a retirada parcial alterou a produtividade de forma negativa. Por sua vez, em locais cujo déficit é menos expressivo e os solos são muito argilosos, como Araras e Iracemápolis, com clima *Cfa* (subtropical úmido segundo classificação de Köppen), não houve diferenças. A literatura mostra resultados variados de TCH em função de locais (Carvalho et al., 2017) e déficit hídrico (Marin et al., 2014; Oliveira et al. 2016), confirmando que as produtividades são dependentes das condições edafoclimáticas, de restrições bióticas e abióticas que possam ocorrer em cada local e da idade do canavial.

Um dos maiores benefícios da palha envolve, justamente, melhorias na infiltração e no maior armazenamento de água no solo, seus efeitos sobre a produtividade eram esperados em áreas cujas condições de clima poderiam afetar mais fortemente esses fatores (Peres et al., 2010), como ocorreu no clima *Aw*. A variação na produtividade nos diferentes locais avaliados sinaliza que há necessidade de cuidados na adoção dessa prática e que em locais com altas probabilidade de déficit hídricos o risco de perdas é elevado, mas que ainda assim, existe potencial de recolhimento da palha sem danos ao TCH em áreas de clima mais constante e mesmo para temperaturas mais baixas.

Tabela 1.2. Compilado de valores de rendimento de colmos de cana-de-açúcar (TCH) obtidos em experimentos conduzidos em diferentes localidades, variedades de cana, épocas de colheita e quantidades de palha mantidas após a colheita.

Pesquisa conduzida entre 2010 e 2013 - Araras, SP (Usina São João) variedade RB 84-5210, latossolo com 77% de argila; colheita mecanizada da cana no meio da safra (agosto); distribuição manual da palha.						
Média palha (base seca)	0 t ha ⁻¹	3,3t ha ⁻¹	6,6t ha ⁻¹	10t ha ⁻¹	13,4t ha ⁻¹	Equação ns - CV-8%
TCH acumulado 3 cortes	299*	288	304	304	300	
TCH médio	99	96	101	101	100	
Pesquisa conduzida entre 2012 e 2013 - Itacemópolis, SP (Usina Itacema), variedade CTC14, latossolo com 70% de argila; colheita mecanizada da cana no final da safra (novembro); distribuição manual da palha.						
Média palha (base seca)	0 t ha ⁻¹	3,1 t ha ⁻¹	6,2 t ha ⁻¹	9,2 t ha ⁻¹	12,3 t ha ⁻¹	Equação ns - CV-13%
1ª soca	96	95	85	83	92	
Pesquisa conduzida entre 2012 e 2017 - Guaíra, SP (Usina Açucareira Guaíra), variedade RB 86-7515, latossolo com 54% de argila; colheita mecanizada da cana no final da safra (outubro); distribuição mecanizada da palha, usando o os ventiladores do extrator primário e secundário.						
Média palha (base seca)	0 t ha ⁻¹	3,3 t ha ⁻¹	8,2 t ha ⁻¹	11,0 t ha ⁻¹	15,7 t ha ⁻¹	Equação Y=561 + 0,5x r2=0,96 (**0,001 CV-5%)
TCH acumulado 6 cortes	489	500	502	516	530	
TCH médio	82	83	84	86	88	
Pesquisa conduzida entre 2014 e 2020 - Guaíra,SP (Usina Açucareira Guaíra), variedade IAC 95-5000, latossolo com 63% de argila; colheita mecanizada da cana no meio da safra (agosto); distribuição mecanizada da palha, usando o os ventiladores do extrator primário e secundário.						
Média palha (base seca)	0 t ha ⁻¹	5,2 t ha ⁻¹	9,1 t ha ⁻¹	14,3 t ha ⁻¹		Equação Y=3987 + 1,25x - 0,009x² - r2=0,98 (**0,01 - CV-7%)
TCH acumulado 6 cortes	397	434	437	431		
TCH médio	66	72	73	72		

* Valores analisados na linha, por regressão, dentro de cada localidade.

Um questionamento que surgiu ao se observar o efeito do recolhimento da palha sobre o rendimento de colmos (Tabela 1.2), justamente nos ensaios com maior tempo de coleta (6 cortes), foi se os efeitos poderiam ser resultado de perdas na qualidade química do solo. A fim de entender essa questão, foram realizadas análises de mineralização da palha em campo (Figura 1.13). Os valores observados para o período de um ano agrícola (um corte) variaram entre 42 e 66% de mineralização, a depender do local e da variedade (Tabela 1.3). Verificou-se também a queda na relação C:N, com valores iniciais próximos de 100 chegando a 37, após uma safra e de 20 após duas safras. Assim, de maneira geral, poderia ser sugerido um valor médio de 54% para a mineralização dentro de uma safra e de 91% para a mesma palha mantida por duas safras.

Fotos: Nilza Patrícia Ramos



Figura 1.13. Imagens dos sacos de decomposição, acondicionados em campo, para estudos de mineralização da palha de cana-de-açúcar.

Tabela 1.3. Taxas de decomposição, valor da relação C:N, obtidos em experimentos conduzidos em diferentes localidades, variedades de cana, épocas de colheita e quantidades de palha mantidas após a colheita.

Variedade	% decomp	C:N inicial	C:N final	dias	Local	Referência
RB 86-7517	42-58	100	-	310	Guaíra, SP	Ramos et al., 2015
CTC14	49-59	-	-	283	Iracemápolis, SP	Stancate et al., 2015
RB 84-5210	66	100	37	282	Araras, SP	Ramos et al., 2016
IAC 95-5000	58	96	39	320	Guaíra, SP	Ferreira, 2017
RB 84-5210	91	100	20	632	Araras, SP	Ramos et al., 2016

A mineralização da palha disponibiliza nutrientes no solo (Cerri et al., 2011; Trivelin et al., 2013; Carvalho et al., 2017) e incorpora C no sistema (La Scala et al., 2012; Tenelli et al., 2021), sendo que sua retirada pode representar menor sustentabilidade da produção no tempo, principalmente em solos com textura mais arenosa (Tenelli et al., 2021). A estabilização do C no solo tende a ser lenta devido à elevada relação C/N da palha (Tabela 1.3). Em Guaíra, SP, com a variedade IAC 95-5000 (Tabela 1.2), não foi possível verificar alteração na concentração de C no solo nas camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade, que apresentaram valores médios de, respectivamente, 19,45 e 16,79 g kg⁻¹ de C. Nesse caso, houve manejo de diferentes quantidades de palha no sistema, durante quatro cortes consecutivos. O nitrogênio, entretanto, nesse mesmo experimento, aumentou linearmente com a quantidade de palha mantida sobre solo (Figura 1.14).

No limite, a reciclagem do N com ajuda da palha contribui para o aumento do potencial de fornecimento de N no sistema, seja para suprir parcialmente a demanda da cultura em curto ou longo prazo (Robertson; Thorburn, 2007; Ferreira et al. 2015), seja para estabilizar maior proporção de C no solo, a fim de alcançar metas de sequestro de C importantes para o setor, para a economia e para o equilíbrio climático global (Groenigen et al., 2017).

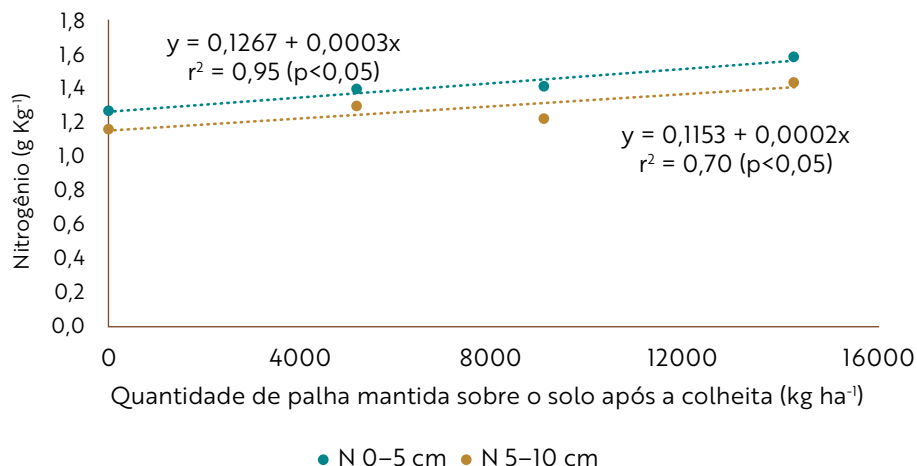


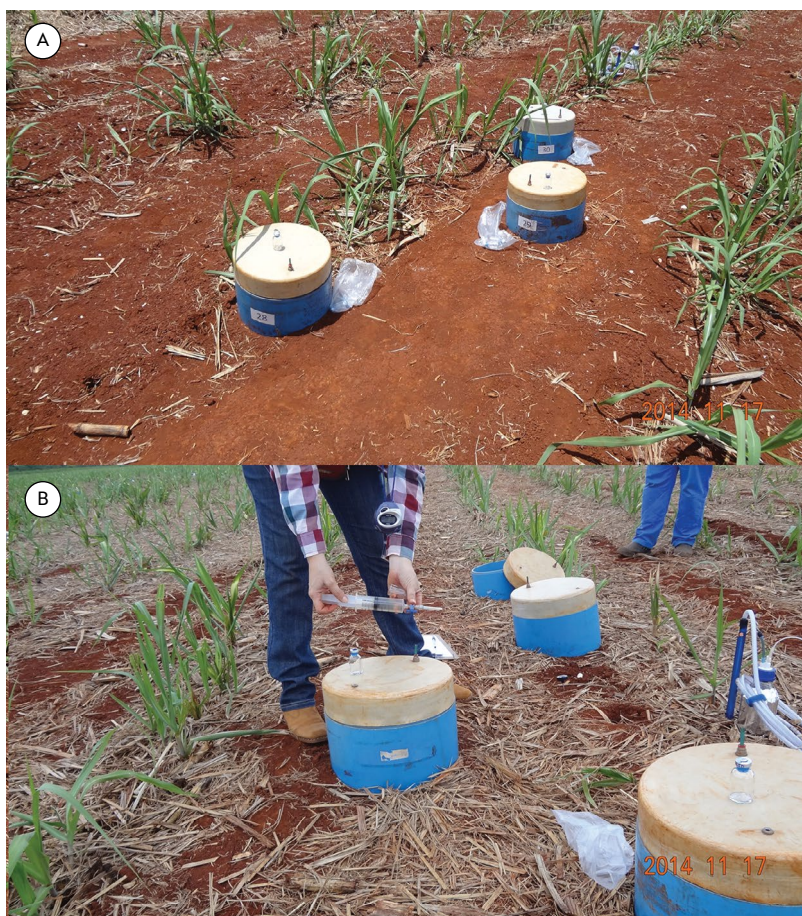
Figura 1.14. Nitrogênio observado nas camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade em análise realizada na terceira soca da variedade IAC95-5000, com manutenção de diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar após a colheita (Guaíra, SP).

A respeito da mineralização dos demais nutrientes que podem ser ciclados com ajuda da palha, segue na Tabela 1.4, um compilado dos resultados de análises de fertilidade do solo para os mesmos ensaios da Tabela 1.2. Nota-se, que a retirada parcial da palha não alterou significativamente os níveis de P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio) do solo na camada 0-20 cm de profundidade, após cortes sucessivos da cana. Com isso, entende-se que a continuidade do uso das recomendações direcionadas à cana-crua pode atender em parte as áreas com retirada parcial de palha; considerando que os níveis de nitrogênio se reduzem (Figura 1.14) e que há necessidade de reposição adicional do N na forma de fertilizante mineral, em médio-longo prazos.

Tabela 1.4. Resultados de análises de fertilidade do solo de três experimentos realizados com manutenção de diferentes quantidades de palha mantidas sobre o solo após a colheita, por socas sucessivas. Médias obtidas após análise de variância e teste Tukey, entre níveis de palha dentro de cada local.

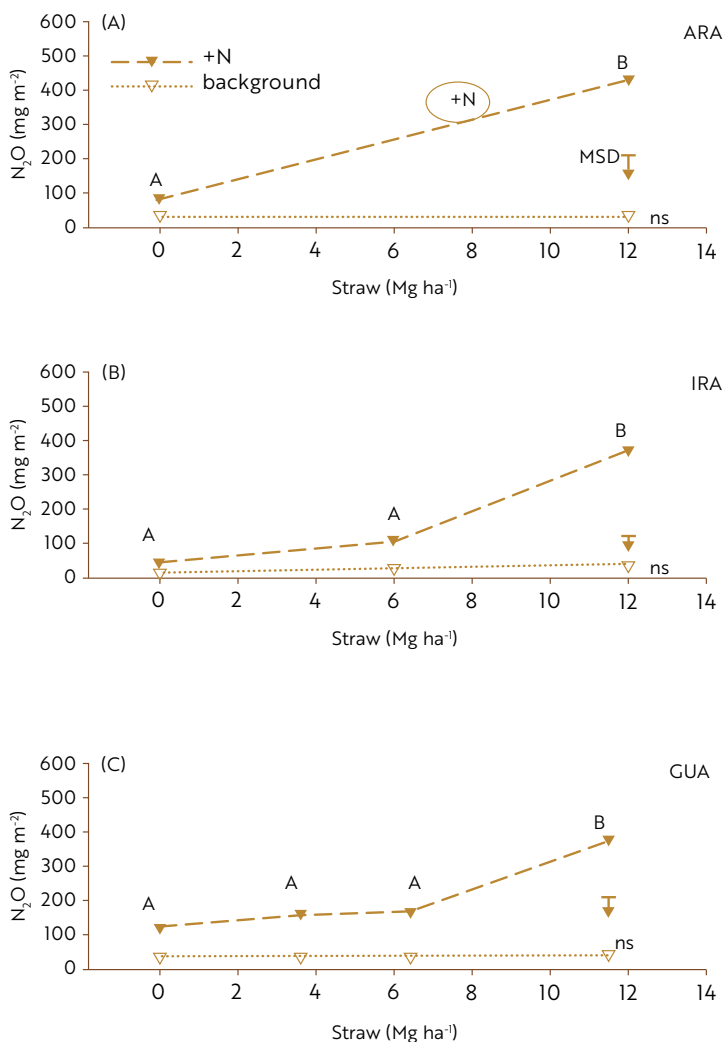
Local	Variedade	M.O	pH	P	K	Ca	Mg	CTC
				mg dm ⁻³	mmolc dm ⁻³			
Araras, SP	RB 84-5210	30,7	4,8	21,8	2,09	28,8	14,4	96
Guaíra, SP	RB 86-7517	-	5,2	3,60	0,61	25,2	5,2	62
Guaíra, SP	IAC 95-5000	-	5,6	14,2	1,2	34,2	8,7	78

Ainda a respeito da mineralização do nitrogênio vindo da palha, ao mesmo tempo que contribui para o enriquecimento químico do solo e para o uso pelas plantas, também pode aumentar as emissões de GEE. Procurando elucidar esse efeito ambiental, foram conduzidos experimentos de quantificação de emissões de GEE em áreas com diferentes recolhimentos de palha (Figura 1.15). Para óxido nitroso (N_2O), verificou-se, em coletas realizadas nas safras 2012–2013 e 2014–2015, que há aumento das emissões acumuladas nas áreas em que se usou fertilizante nitrogenado associado à manutenção do solo com quantidades de palha superiores a 8 t ha^{-1} (base seca) (Figura 1.16).



Fotos: Ana Paula C. Packer

Figura 1.15. Imagens de coletas de GEE em áreas sem recolhimento de palha (A) e com recolhimento de palha após a colheita (B).



*A barra vertical indica diferença significativa mínima - MSD do teste de Tukey ($< 0,05$) ($n = 4$). Diferentes letras maiúsculas diferem significativamente (Tukey $p \leq 0,05$).

ns Não significativo.

Figura 1.16. Emissão cumulativa de N_2O proveniente da aplicação de fertilizantes nitrogenados, associados à remoção (oST) e manutenção de diferentes níveis de palha (ST), comparado com as emissões de fundo sem aplicação de fertilizantes. (Coletas realizadas nas safras 2012–2013 e 2014–2015, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar nos municípios de: (A) Araras, SP (ARA), (B) Iracemápolis, SP (IRA) e (C) Guará, SP (GUA), sob solo com 62 a 70% de argila e declividade inferior a 4%).

O grande conjunto de dados levantados indica a tendência de intensificação nas emissões de N_2O , quando se associa a adubação (em superfície) nitrogenada mineral com a permanência da palha sobre o solo. Essa elevação pode ser da ordem de nove a 14 vezes em relação às áreas sem palha. Isso se deve à maior atividade microbiana, favorecida pela elevada disponibilidade de carbono e maior umidade que se mantém com as camadas elevadas da palha protegendo o solo. Mesmo nesse cenário, os valores apontam para um fator de emissão N_2O de 0,54%, que está abaixo do indicado pelo IPCC, ou seja, de 1% do total de N mineral aplicado emitido na forma de N_2O (Calvo Buendia et al., 2019).

De forma geral, a retirada da palha como uma prática agrícola deve ser realizada com atenção em áreas de déficit hídrico; nos demais locais, o uso pode ser recomendado com alguma cautela, pois mesmo não sendo verificados prejuízos ao rendimento de colmos, há um potencial de desequilíbrio na matéria orgânica do solo em longo prazo. Com efeito, o produtor deve ter ciência que ao longo dos ciclos precisará repor o nitrogênio que sai com a palha recolhida e poderia ser incorporado na área pela mineralização. O equilíbrio entre custos e benefícios dessa prática depende também do mercado; considerando o valor do fertilizante a ser reposto, da operação de recolhimento e do preço da palha.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo da última década, a equipe de pesquisa com cana-de-açúcar da Embrapa Meio Ambiente e seus parceiros entregaram resultados de pesquisa que subsidiam decisões do setor sucroenergético, compõem políticas públicas e inspiram produtores e empreendedores a adotar práticas agrícolas mais sustentáveis. A redução no volume de material propagativo para cana-de-açúcar promovida pelo uso das gemas individualizadas; um período adicional de proteção contra déficit hídrico na implantação em campo promovido pelo uso de inoculante biológico associado às mudas pré-brotadas; o potencial de adoção do preparo reduzido e plantio direto em canaviais sem restrições bióticas e edafoclimáticas; informações sobre o potencial de incorporação de carbono e nitrogênio ao solo, na reforma do canavial, com o uso de leguminosas de cobertura; a manutenção da produtividade acrescida dos benefícios ambientais que envolvem menores emissões de gases de efeito estufa, a incorporação de nitrogênio ao sistema promovidos com o manejo da palhada são algumas contribuições para a sustentabilidade do sistema produtivo da cana para a economia do país e para o alinhamento com a pauta global de combate às mudanças climáticas.

A necessidade de ajustes de manejo, de inovação e de uma agenda estratégica para o setor sucroenergético são fundamentais para a manutenção de produtividades competitivas da cana-de-açúcar, num cenário de desafios climáticos intensos,

mudança na consciência de consumo, demanda crescente por fontes renováveis de energia e presença de uma nova estrutura de governança, que preza pelo social e pelo ambiental. Nesse sentido, este capítulo permitiu uma revisão aos resultados, contribuições e avanços realizados pela ou com a participação da Embrapa Meio Ambiente, que melhoraram a percepção quanto às ações prioritárias, aguçando o olhar para o futuro e para uma agricultura que projete o Brasil como exemplo mundial sustentável no setor.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Painel dinâmico do Lastro de Emissões de CBIOS**; período de tempo considerado: jan2020-jan2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-do-renovabio/painel-dinamico-da-cbio>. Acesso em: 26 fev. 2024.
- ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 175-185, 1995.
- AMBROSANO, E. J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A.; DIAS, F. L. F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; ACHS, R. C. C.; AZCÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. **Bragantia**, v. 70, n. 4, p. 810-818, 2011.
- BRASIL. Lei nº 13576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 27 dez. 2017. Seção I, p. 4.
- BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Valor bruto da produção nacional: 2022**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias-2022/valor-da-producao-agropecuaria-de-2022-esta-estimado-em-r-1-241-trilhao-1>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- CABRAL, O. M. R.; RAMOS, N. P.; PACKER, A. P. C.; ANDRADE, C. A. de; FREITAS, H. C. de; PIRES, C. Emissões de CO₂ observadas durante a reforma de canavial. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016, Ribeirão Preto. **Trabalhos apresentados...** Ribeirão Preto: STAB, 2016. p. 345-348.
- CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE S.; OSAKO, A.; PYROZHENKO, Y.; SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (ed.). **2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: volume 4: agriculture, forestry and other land use. Geneve: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- CAPAZ, R. S.; CARVALHO, V. S. B.; NOGUEIRA, L. A. H. Impact of mechanization and previous burning reduction on GHG emissions of sugarcane harvesting operations in Brazil. **Applied Energy**, v. 102, p. 220-228, 2013.
- CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Global Change Biology and Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1181-1195, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>.
- CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A.. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p. 57-78.
- CERRI, C. C.; GALDOS, M. V.; MAIA, S. M. F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; POWLSON, D.; CERRI, C. E. P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 23-28, 2011. Special issue: soil organic matters.

CHERUBINI, F. The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 7, p. 1412-1421, 2010.

COELHO, M. S.; MENDONÇA, E. S.; LIMA, P. C.; GUIMARÃES, G. P.; CARDOSO, I. M. Qualidade da matéria orgânica de solos sob cultivo de café consorciado com adubos verdes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 6, p. 1576-1586, 2013.

CONAB. **Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil**: edição para a safra 2015/16. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/perfil-do-setor-sucroalcooleiro>. Acesso em: 4 mar. 2020.

CONAB. **Séries históricas das safras**: área total: 2021. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 18 jan. 2022.

CONAB. **Séries históricas das safras**: agrícola. 2017/21. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 4 mar. 2021.

CURY, T. N.; DE MARIA, I. C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 6, p. 1929-1938, 2014.

DE LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANEQUINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com e sem queima de canavia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 2, p. 789-800, 2008.

DIAS, R. M.; RAMOS, R.; FERREIRA, T. E.; VIDAL, T. A.; ROSSI, P.; ALVES, R. P.; GOMES, G. V.; RAMOS, N. P. Acúmulo de nitrogênio na cana-de-açúcar após duas socas cultivadas com diferentes níveis de palha na região de Guaíra, SP. In: WORKSHOP AGROENERGIA, 10., 2016, Ribeirão Preto. **Matérias primas**: anais. Ribeirão Preto: IAC, 2016. 7 p.

DORNELES JUNIOR, J.; ALVES, R. P.; SANTOS, R. M. dos; RAMOS, R.; RAMOS, N. P.; PRADO, S. S. Influência da quantidade de palhada em cana-de-açúcar na população de *Mahanarva fimbriolata* (Stål, 1854) (Hemiptera: Cercopidae). In: WORKSHOP AGROENERGIA, 9., 2015, Ribeirão Preto. **Matérias primas**: anais... Ribeirão Preto: Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2015. RE 088. 7 p.

FAOSTAT. **Crop and livestock products**: data. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 29 de agosto de 2021.

FAVERO, C.; JUCKSCH, I.; ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M. Modificações na população de plantas espontâneas na presença de adubos verdes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 11, p. 1355-1362, 2001.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 31-44.

FERREIRA, T. E. **Decomposição da palha de cana-de-açúcar em área de recolhimento variável sob adubação nitrogenada mineral ou inoculação com bactérias diazotróficas**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; FARONI, C. E.; GARSIDE, A. L.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. *Global Change Biology Bioenergy*, v. 8, n. 5, p. 859-866, 2015.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 1, p. 49-57, 2006.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).

GROENIGEN, J. W. van; KESSEL, C. van; HUNGATE, B. A.; OENEMA, O.; POWLSON, D. S.; GROENIGEM, K. J. van. Sequestering soil organic carbon: a nitrogen dilemma. *Environmental Science and Technology*, v. 51, n. 9, p. 4738-4739, 2017.

GROVER, M.; ALI, S. Z.; SANDHYA, V.; RASUL, A.; VENKATESWARLU, B. Role of microorganisms in adaptation of agriculture crops to abiotic stresses. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 27, n. 5, p. 1231-1240, 2011.

KAVAMURA, V.; SANTOS, S. N.; SILVA, J. L. da.; PARMA, M. M.; AVILA, L. A.; VISCONTI, A.; ZUCCHI, T. D.; TAKETANI, R. G.; ANDREOTE, F. D.; MELO, I. S. de. Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. *Microbiological Research*, v. 168, n. 4, p. 183-191, 2013.

LA SCALA JUNIOR, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G.T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 91, n. 1-2, p. 244-248, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.11.012>.

LA SCALA JUNIOR, N.; FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. *Brazilian Journal of Biology*, v. 72, n. 3, p. 775-785, 2012. Supplement.

LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P. **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2012. 16 p. (Documentos IAC, 109).

LEAL, M. R. L. V.; WALTER, A. S.; SEABRA, J. E. A. Sugarcane as an energy source. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 3, n. 1, p. 17-26, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-012-0055-1>.

MADARI, B. E.; CUADRA, S. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; HIGA, R. C. V.; RAMOS, N. P.; ANDRADE, C. A. de; KEMENES, A.; GONDIM, R. S. O papel da agricultura na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. In: CUADRA, S. V.; HEINEMANN, A. B.; BARIONI, L. G.; MOZZER, G. B.; BERGIER, I. (ed.). **Ação contra a mudança global do clima: contribuições da Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. p. 90-106. E-book. (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 13).

MAY, A.; RAMOS, N. P. **Uso de gemas individualizadas de cana-de-açúcar para a produção de mudas pré-brotadas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 29 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 29).

MAY, A.; RAMOS, N. P.; SANTOS, M. de S. dos; SILVA, E. H. F. M. da; MELO, I. S. de **Promoção de crescimento de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar inoculadas com *Bacillus aryabhattai* em diferentes frequências de irrigação**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 27 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 80).

MAY, A.; SANTOS, M. de S. dos; SILVA, E. H. F. M. da; VIANA, R.S.; VIEIRA JR, N.A.; RAMOS, N. P.; MELO, I.S. Effect of *Bacillus aryabhattai* on the initial establishment of pre-sprouted seedlings of sugarcane varieties. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, e11510212337, 2021.

MARIN, F.; THORBURN, P.; COSTA, L. G.; OTTO, R. Simulating long-term effects of trash management on sugarcane yield for Brazilian cropping systems. **Sugar Tech**, v. 16, n. 2, p. 164-173, 2014

MENANDRO, L. M. S.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J.; KÖLL, O. T.; PIMENTA, M. T. B.; SANCHES, G. M.; RABELO, S. C.; CARVALHO, J. L. N. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 3, p. 488-504, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.1760>.

NASER, V.; SHANI, E. Auxin response under osmotic stress. **Plant Molecular Biology**, v. 91, n. 6, p. 661-672, 2016.

OLIVEIRA, A. P. P.; THORBURN, P. J.; BIGGS, J. S.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; ZANOTTI, N. E. The response of sugarcane to trash retention and nitrogen in Brazilian coastal tableland: a simulation study. **Experimental Agriculture**, v. 52, n. 1, p. 69-86, 2016.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 201-210, 2011.

PARK, Y.-G.; MUN, B.-G.; KANG, S.-M.; HUSSAIN, A.; SHAHZAD, R.; SEO, C.-W.; KIM, A.-Y.; LEE, S.-U.; OH, K. Y.; LEE, D. Y.; LEE, I.-J.; YUN, B.-W. *Bacillus aryabhattai* srbo2 tolerates oxidative and nitrosative stress and promotes the growth of soybean by modulating the production of phytohormones. **PLOS ONE**, v. 12, n. 3, p. e0173203, 2017.

PEREIRA, G. S.; MAHL, D.; SOUZA, C. H. W.; PRAMPERO, V. Efeito do cultivo de *Crotalaria juncea* em rotação com cana-de-açúcar sobre parâmetros físicos do solo. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 6, n. esp., p. 1-12, 2017.

PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha da cana-de-açúcar. **Engenharia. Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 875-886, 2010.

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J. G. M.; CECON, P. R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 35-40, 2004.

RAMAIAH, B.; RAO, G. N.; PRASAD, G. Elimination of internodes in sugarcane seed piece. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 16., 1977, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: ISSCT, 1977. p. 1509-1513.

RAMOS, N. P.; YAMAGUCHI, C. S.; PIRES, A. M. M.; ROSSETTO, R.; POSSENTI, R. A.; PACKER, A. P. C.; CABRAL, O. M. R.; ANDRADE, C. A. de. Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1492-1500, 2016.

- RAMOS, R.; STANCATTE, R. S.; VIEIRA, H. B.; ROSSI, P.; DEGASPARI, I. A. M.; GOMES, G. V.; RAMOS, N. P. Dinâmica de decomposição de palha sob taxas variadas de recolhimento em canavial de segunda soca - Guaira, SP. In: WORKSHOP AGROENERGIA, 9., 2015, Ribeirão Preto. **Matérias primas: anais**. Ribeirão Preto: Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2015. RE 062. 7 p.
- RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; QUESADA, D. M.; COELHO, C. H. M.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; GUERRA, J. G. M.; URQUIAGA, S. **Incorporação de leguminosas para fins de adubação verde em pré-plantio de cana-de-açúcar**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2000. 18 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 124).
- ROBOTHAN, B. G.; CHAPPELL, W. G. High quality planting billets-whole-satlk planters billets compared to billets from modified and unmodified harversters. **Proceedings of the Australian Society Sugar Cane Technologists**, v. 24, p. 1-10, 2002.
- ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. **Australian Journal of Soil Research**, v. 45, n. 1, p. 1-11, 2007.
- ROSSETTO, R.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; MELLIS, E. V.; VARGAS V. P.; CANTARELLA H.; PRADO, H.; DIAS, F. L. F.; LANDELL, M. G. A.; BRANCALIANO, S. R.; GARCIA, J. C. Cana-de-açúcar: cultivo com sustentabilidade. **Informações Agrônomicas**, v. 142, p. 1-13, 2013.
- SANTOS, F. A.; QUEIROZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. Revisão. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000500025>.
- SILVA, J. A. A.; VITTI, G. C.; STUCHI, E. S.; SEMPIONATO, O. R. Reciclagem e incorporação de nutrientes ao solo pelo cultivo intercalar de adubos verdes em pomar de laranja-‘Pêra’. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 1, p. 225-230, 2002.
- SOUZA, G. B.; MARTINS FILHO, M. V.; MATIAS, S. Perdas de solo, matéria-orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba, SP. **Engenharia. Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 490-500, 2012.
- STANCATTE, R. S.; RAMOS, R.; MORAES, G. C.; ROSSI, P.; VIEIRA, H. B.; ROSSETTO, R.; PACKER, A. P. C.; RAMOS, N. P. Decomposição de palha de cana-de-açúcar em cultivo de primeira soca - Iracemápolis, SP. In: WORKSHOP AGROENERGIA, 9., 2015, Ribeirão Preto. **Matérias primas: anais**. Ribeirão Preto: Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2015a. RE 063. 7 p.
- STANCATTE, R. S.; VIEIRA, H. B.; SOUZA, D. T.; MELO, I. S. de; RAMOS, N. P. Uso de bactérias tolerantes à seca em mudas de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto Agrônômico, 2015b. RE Nº 15422. 8 p.
- TAVARES, O. C. H.; 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.
- TENELLI, S.; BRODONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; CARVALHO, J. N. Multilocation changes in soil carbon stocks from sugarcane straw removal for bioenergy production in Brazil. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 7, p. 1099-1111, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12832>.

TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; FARONI, C. E.; OLIVEIRA, E. C. A.; CANTARELLA, H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Scientia Agricola*, v. 70, n. 5, p. 345-352, 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA. **Protocolo agroambiental**: números do setor. Disponível em: <https://unica.com.br/iniciativas/protocolo-agroambiental/>. Acesso em: 20 jun. 2021.

XAVIER, M. A.; LANDELL, M. G. de A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P.; MENDONÇA, J. R. de; DINARDO-MIRANDA, L. L.; SCARPARI, M. S.; ANJOS, I. A. dos; AZANIA, C. A. M.; BRANCALÃO, S. R.; KANTHACK, R. A. D.; AFERRI, G.; SILVA, D. N. da; BIDÓIA, M. A. P.; CAMPOS, M. F. de; PERRUÇO, D.; MATSUO, R. S.; NEVES, J. C. T.; CASSANELI JÚNIOR, J. R.; PERRUÇO, L.; PETRI, R. H.; SILVA, T. N. da; SILVA, V. H. P. da; THOMAZINHO JÚNIOR, J. R.; MIGUEL, P. E. M.; LORENZATO, C. M.; GARCIA, J. C. **Fatores de desuniformidade e kit de pré-brotação IAC para sistema de multiplicação de cana-de-açúcar - mudas pré-brotadas (MPB)**. Campinas: Instituto Agronômico, 2014. 23 p. (Documentos IAC, 113).