

A cana-de-açúcar e suas relações com a matéria orgânica do solo

Nilza Patrícia Ramos

Cristiano Alberto de Andrade

Raffaella Rossetto

Adriana Marlene Moreno Pires

Introdução

A cana-de-açúcar é um dos destaques na agricultura brasileira, ocupando 9,9 milhões de hectares de área plantada na safra 2020/21 (CONAB, 2021a). Com isto, conquistou a terceira posição entre os produtos que mais contribuíram para o valor bruto da produção em 2020, que alcançou um total de R\$580 bilhões. Esse bom desempenho da cultura nos campos agrônômico e econômico, entretanto, deve agora perseguir/alcançar patamares de excelência socioambientais, com destaque para critérios que consideram o balanço de carbono (C) e a responsabilidade climática.

O C contido na matéria orgânica do solo é um dos importantes compartimentos para a contabilidade do carbono com vistas ao desempenho ambiental de produtos e a aferição do alcance de metas setoriais, regionais ou nacionais de redução na emissão de gases de efeito estufa. A matéria orgânica, já há muito tempo, é monitorada nos talhões de produção de cana-de-açúcar, seja para uma estimativa aproximada da disponibilidade nitrogênio (N) para a cultura, seja como referência empírica associada à maior ou menor sustentabilidade da produção. Há que se considerar, nesse sentido, que a cana-de-açúcar, introduzida em solo brasileiro a partir do ano de 1532, logo após o descobrimento (Figueiredo, 2008), traz uma certa variação no manejo agrícola, com fortes impactos na matéria orgânica do solo. É essencial, também, posicionar a cultura canavieira como importante *driver* na busca por balanços de C mais favoráveis na agricultura brasileira, inclusive como parte do esforço nacional de mitigação das mudanças climáticas. Esse posicionamento se deve tanto às características de semi-perenidade da cultura e alto potencial de produção de biomassa, como pela geração de bioprodutos (etanol, bioplástico

e outros compostos da química verde) que substituem compostos da matriz fóssil, além do reaproveitamento praticamente total dos resíduos agrícolas e industriais, como fonte de energia, matéria orgânica para o solo, e de nutrientes para as plantas.

Neste capítulo, a relação do cultivo da cana-de-açúcar com a matéria orgânica do solo será tratada em tópicos sequenciais que consideram contribuições: (i) da biomassa vegetal que fica no campo, promovendo o enriquecimento da matéria orgânica do solo; (ii) dos resíduos agroindustriais, que retornam ao campo como fonte de matéria orgânica e nutrientes; e, (iii) das práticas de manejo que impactam positiva ou negativamente a produção de biomassa e resíduos, bem como a estabilização da matéria orgânica do solo. Ao final é apresentado um balanço simplificado de carbono na produção de cana-de-açúcar, usando as principais entradas e saídas.

A planta de cana-de-açúcar e a ciclagem de nutrientes

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae e os materiais comerciais, atualmente plantados, são híbridos de várias espécies do gênero *Saccharum*, com ciclo de desenvolvimento perene (Scarpari; Beauclair, 2008). No Brasil, é explorada como semi-perene, para maior aproveitamento do potencial de produção de colmos, que tende a cair em função da queda na qualidade do manejo ao longo do tempo, e não necessariamente do envelhecimento da touceira (Marin et al., 2019).

Um ciclo médio de produção da cana-de-açúcar, na região Centro-Sul do Brasil (maior produtora), possui cerca de cinco cortes (CONAB, 2017), com rendimento médio de colmos da ordem de $76 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, considerando-se a média das safras 2016 até 2020 (CONAB, 2021a), mas com valores superiores a 150 t ha^{-1} em muitas áreas de cana-planta ou cana irrigada (Marin et al., 2019). Este volume de biomassa exportado do campo é apenas parte do material vegetal produzido pela cana. A outra parte é residual do sistema aéreo, formada pelo ponteiro e pelas folhas secas ainda presas à planta, que formarão a palha após a colheita da cana crua (sem queima prévia para despalha). Após a colheita crua, essa palha é mantida sobre o solo e passa a compor, juntamente com o sistema aéreo da cana em rebrota e desenvolvimento, o que se denomina de biomassa acima do solo (Figura 1). O sistema radicular, constituído por rizoma e raízes, compõe a biomassa abaixo da superfície do solo (Figura 1).

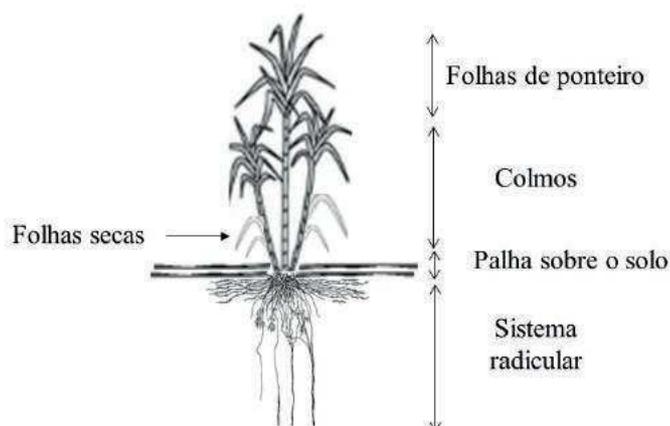


Figura 1. Esquema de distribuição da biomassa na planta de cana-de-açúcar, com os compartimentos acima do solo (folhas de ponteiro + folhas secas + colmos + palha da colheita anterior) e abaixo do solo (sistema radicular).

Fonte: Criação dos autores.

A biomassa total produzida depende, essencialmente, do material genético plantado (variedade), do ciclo da cultura (cana-planta ou soca), do ambiente de produção (clima e solo) e das práticas de manejo adotadas (Bordonal et al., 2018a). Na literatura, são vastos os resultados de produtividade de colmos, representados em toneladas de colmo por hectare (TCH), enquanto a disponibilidade de informações dos demais componentes da planta é mais escassa. Nesse sentido, um compilado de valores da literatura para produtividade de colmos (variando de 43 a 142 t ha⁻¹), biomassa seca de colmos (variando de 15,5 a 38,0 t ha⁻¹), biomassa seca de palha (ponteiros + folhas secas) (variando de 7,9 a 16,5 t ha⁻¹) e biomassa seca de raízes (variando de 0,86 a 5,20 t ha⁻¹) são apresentados na Tabela 1. A produtividade média da cana-de-açúcar recuperada a partir das fontes bibliográficas foi de 98 t colmos ha⁻¹ e os valores médios de biomassa, em base seca, de colmos, palha e raízes foram, respectivamente, de 26,3; 12,2; e 2,7 t ha⁻¹, num total de biomassa produzida igual a 41,2 t ha⁻¹.

Tabela 1. Produtividade de colmos e valores de biomassa seca de colmos, palha e raízes de algumas variedades de cana-de-açúcar.

Variedade	Produtividade de colmos	Biomassa seca			Fonte bibliográfica
		Colmos	Palha ¹	Raízes ²	
		t ha ⁻¹			
RB-85.5156	-	-	-	3,8	Faroni (2004)
SP-85.5536	77	-	-	4,6	Franco et al. (2007)
SP-81.3250	142	38,0	8,7	2,3	Franco et al. (2010)
-	80	-	14,0	-	Figueiredo e La Scala (2011)
-		33,7	13,6	5,2	Cabral et al. (2013)
SP-81.3250	107	-	12,6	1,6	Carvalho et al. (2013)
RB-85.5453	120	-	-	0,9	Souza et al. (2014)
SP-89.1115	-	15,5	8,4	2,5	Vieira-Megda et al. (2015)
SP-81.3250	-	21,9	10,7	-	Ferreira et al. (2016)
RB-96.6928	105	-	-	1,4	Rossi Neto et al. (2018)
RB-96.6928	106	-	-	3,1	Barbosa et al. (2018)
RB96-6928	127	-	13,3	-	Bordonal et al. (2018b)
CTC14	83	-	16,0	-	Lisboa et al. (2018)
RB-86.7515	43	-	14,4	-	Lisboa et al. (2018)
RB-86.7515	100	-	-	2,5	Esteban et al. (2019)
-		26,7	16,5	-	Boschiero et al. (2019)
CTC14	100	30,1	7,9	-	Cherubin et al. (2019)
RB-86.7515	60	18,1	9,8	-	Cherubin et al. (2019)
CTC14	120	-	-	2,7	Melo et al. (2020)

¹Folhas verdes/ponteiros + folhas secas/mortas. ²Valores de raízes excluídos dos rizomas

O colmo, que é o componente exportado na colheita, é o que tem maior contribuição na biomassa total, que representa de 60% a 70%. A palha é o segundo componente em contribuição na biomassa de 20% a 30%, seguido pelas raízes de 10% a 20%, sendo que nesse caso, ambos permanecem no campo. Portanto, a soma da palha com as raízes pode retornar ao solo mais de 30% da biomassa total, o que, em termos quantitativos, é bastante substancial, algo entre 8,8 e 20,7 t ha⁻¹ (Tabela 1). O material que fica no campo se decompõe ao longo dos ciclos subsequentes da cana-de-açúcar, devolvendo C, macro e micronutrientes ao solo, ao que se denomina “ciclagem de nutrientes”. Esse processo faz parte da dinâmica da matéria orgânica do solo, considerando as várias frações componentes, como a matéria orgânica particulada, a matéria

orgânica associada aos minerais e a matéria orgânica dissolvida (Dick et al., 2009). Os nutrientes mineralizados no solo ficam passíveis de absorção pelas plantas, imobilização na biomassa microbiana ou de perdas no sistema.

O potencial de ciclagem de nutrientes da palha, mantida após a colheita mecanizada, varia não só em relação ao total de biomassa seca deste material, mas também de acordo com a sua composição, principalmente proporção entre ponteiros e folhas secas. Isso porque os teores de nutrientes dos ponteiros são superiores aos das folhas secas (Carvalho et al., 2013). Menandro et al. (2017), ao estudar quatro variedades de cana-de-açúcar (RB-85.5453, RB96.6928, RB-86.7515 e IACSP-95.500), em diferentes cortes e locais, verificaram proporções entre ponteiros e folhas secas na palha variando de 29:71 a 50:50, e teores de N, P e K, respectivamente, duas, seis e cinco vezes maiores nos ponteiros, em relação às folhas secas.

No campo, não é possível distinguir os ponteiros das folhas secas após a colheita mecanizada (Figura 2), principalmente em sistemas de colheita com uso de picadores no despontador da colhedora. Com isso, a título de estimativas da contribuição da palha para o sistema solo-planta, pode-se considerar que esta apresenta composição nutricional média, entre 4,7 e 5,4 g kg⁻¹ de N (Ramos et al., 2016; Menandro et al., 2017), 1,3 g kg⁻¹ de P e 7,4 g kg⁻¹ de K (Menandro et al., 2017). Com base nesses teores e na quantidade média de palha calculada com os valores da Tabela 1, estima-se que há potencial para mineralização de cerca de 62,0 kg ha⁻¹ de N, e 16,5 kg ha⁻¹ de P, além da disponibilização de 90,3 kg ha⁻¹ de K, a partir dessa biomassa residual.



Fotos: Nilza Patrícia Ramos

Figura 2. Operação de colheita mecanizada, com deposição de palha sobre o solo.

Em relação às raízes, a literatura é restrita em citar valores. Utilizando-se o teor $11,2 \text{ g kg}^{-1}$ de N (média de 250 amostras analisadas no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental - LBA da Embrapa Meio Ambiente) e $8,0 \text{ g kg}^{-1}$ de K (Silveira et al., 2015), estima-se que o potencial de disponibilização desses nutrientes seja de aproximadamente 30 kg ha^{-1} de N, e 16 kg ha^{-1} de K, a partir da biomassa de raízes (Tabela 1). Assim, estima-se que palha+raízes da cana-de-açúcar retornem ao solo, em média, 92 kg ha^{-1} de N, e 106 kg ha^{-1} de K.

Cabe destacar que a disponibilização de cada nutriente, a partir da ciclagem da palha, tem sua própria dinâmica temporal e pode não acompanhar o processo de decomposição desta biomassa (Carvalho et al., 2017a). O potássio é um exemplo típico, pois é disponibilizado logo no início do processo de decomposição, pela ação das águas da chuva que lava a biomassa sobre o solo (Franco et al., 2013), podendo ser aproveitado pela cultura no mesmo ciclo de crescimento (Vitti et al., 2010).

O N, que à semelhança do potássio, também é extraído em grande quantidade na produção de colmos ($1,0\text{-}1,2 \text{ kg N t}^{-1}$ de colmos), pode ficar imobilizado na palha por períodos mais longos, sendo pouco aproveitado pela planta no ciclo imediatamente após a deposição da palha na superfície do solo, podendo neste período, inclusive, imobilizar nitrogênio do solo (Fortes et al., 2013). Isto ocorre porque a palha possui relação C:N alta, $>90:1$ (Gava et al., 2005, Ramos et al., 2016) e a comunidade microbiana decompositora precisa do N disponível no solo (se houver) para complementar a baixa oferta de N da palha. Nesse caso, há um período transiente de imobilização parcial de N do solo, até que seja atingido um novo equilíbrio com a matéria orgânica do solo (Trivelin et al., 2013). Considerando que as plantas não aproveitarão o N em períodos curtos após a deposição da palha, é justamente o enriquecimento da matéria orgânica do solo, a longo prazo, que constitui o maior potencial de contribuição em N (Carvalho et al., 2017a).

Com base no teor médio de C na palha de cana-de-açúcar igual a 465 g kg^{-1} (média de 2.205 amostras analisadas no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental - LBA da Embrapa Meio Ambiente), combinada à biomassa de $12,2 \text{ t ha}^{-1}$ de palha (Tabela 1), pode-se estimar em cerca de 5.673 kg ha^{-1} a quantidade de C depositada via palha após a colheita. A dinâmica desse C da palha, que apresenta elevada relação C:N, pode ser ensaiada usando-se como fundamento a estequiometria da respiração aeróbia, na qual, após atingida a relação C:N de $30:1$, dois terços do C são liberados na forma de CO_2 e um terço fica na biomassa microbiana, admitindo-se que este último é passível de estabilização na forma de húmus. O que acontece com o C da palha no processo de decomposição em que a relação C:N sai de um inicial de $90:1$ e

o que alcança, após certo período de tempo (> 1 ano) (Ramos et al., 2016)? A resposta é variável, pois se não houver imobilização alguma de N na palha, todo o C entre 90:1 e 30:1 é perdido na forma de CO_2 , em função da atividade microbiana de respiração do C da palha e manutenção do N na biomassa microbiana. Caso ocorra imobilização de N na palha, que alteraria a relação C:N inicial, por exemplo, as perdas de C via respiração (liberação de CO_2) serão reduzidas proporcionalmente à quantidade de N imobilizada.

Admitindo-se que $5.673 \text{ kg C ha}^{-1}$ sejam depositados via palha, com relação C:N de 90:1, até alcançar 30:1, seriam liberados $3.782 \text{ kg C ha}^{-1}$ via CO_2 . A partir desse ponto, com a palha apresentando relação C:N de 30:1, dois terços do C residual na palha seriam ainda liberados como CO_2 ($1.261 \text{ kg C ha}^{-1}$), e 630 kg C ha^{-1} seria estabilizado na forma de húmus. Essa estimativa simples não contempla outros mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo, como proteção física e ligação química (Six et al., 2002), que podem ser importantes em solos de textura média a argilosa, além de, conforme mencionado, negligenciar a imobilização de N do solo.

No entanto, a estimativa dá uma noção de valores mínimos esperados de incremento de C no solo em função da deposição da palha e da qualidade dessa palha (relação C:N), podendo-se, por exemplo, dobrar a estabilização de C no solo caso a relação C/N caia pela metade do valor inicial de 90:1, devido ao uso de fertilização nitrogenada, palha sobre palha de cultivos anteriores, aplicação de resíduos ricos em N, como cama-de-frango, e outros. Os 630 kg C ha^{-1} , estabilizados a partir dos $5.673 \text{ kg C ha}^{-1}$ e depositados via palha, representam 11% do total. Este valor é bastante próximo do estimado por Robertson e Thorburn (2007), superior aos 5,6% obtidos por Sousa Júnior et al. (2018), mas cerca da metade a um terço do que foi encontrado por Segnini et al. (2013) e Tenelli et al. (2021). De fato, existem variações nas taxas de acúmulo de C em função do próprio aporte de palha (Segnini et al., 2013), que controla outros fatores como umidade e temperatura do solo, do uso ou não de plantas de cobertura/adubo verde na reforma (Sousa Júnior et al., 2018) e da textura do solo (La Scala et al., 2012; Tenelli et al., 2021) dentre outros. Taxas de acúmulo anual de C no solo em áreas com cana-de-açúcar, colhida mecanicamente, com manutenção da palha no campo, têm variado entre 0,36 e algo um pouco superior a $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ (Robertson; Thorburn, 2007; Cerri et al., 2011; Segnini et al., 2013; Sousa Júnior et al., 2018; Tenelli et al., 2019). Porém há um reconhecido efeito deletério do preparo do solo na reforma do canavial, que pode comprometer de 80% a 100% do incremento médio anual (La Scala et al., 2012), embora o preparo reduzido (Segnini et al., 2013; Tenelli et al., 2019) e o uso de adubo verde na reforma podem mitigar as perdas (Bordonal et al., 2018a).

Os resíduos agroindustriais

O colmo é o produto de entrada na agroindústria canavieira, a partir do qual se extrai o caldo que contém açúcares. A sacarose é a base para a produção do açúcar e do etanol (41,3 milhões t e 29,7 bilhões L, na safra 2020-21, segundo CONAB, 2021b). Entretanto, vários resíduos gerados na produção de açúcar e/ou etanol foram valorizados ao longo do tempo, devido à possibilidade de reuso na geração de energia e na reposição de nutrientes no campo, dentre outros usos. Assim, após a entrada de 1 t de cana nas moendas, são produzidos em média 110 kg de açúcar, de 13 a 80 L de etanol (a depender do mix), 220 kg de bagaço, 35 kg de torta de filtro, 10 kg de cinzas, e 156 a 1040 L de vinhaça (Rossetto et al., 2018).

O bagaço é aproveitado, em quase sua totalidade para geração de bioeletricidade em 413 termoelétricas do setor sucroenergético que, em janeiro de 2022, atingiu 12.021 MW em potência instalada (UNICA, 2022). Já a vinhaça, a torta de filtro, e as cinzas são os resíduos que retornam para o campo como fonte de nutrientes para as plantas e matéria orgânica para o solo. Estes resíduos são usados como adubo orgânico no Brasil há longa data, atribuindo-se ao seu uso frequente parte do sucesso na manutenção da produtividade, observada ao longo dos anos nos campos cultivados com cana-de-açúcar, comparativamente, ao que ocorre em outros países (Rossetto et al., 2008).

Dados quantitativos estimados de vinhaça e de torta de filtro disponibilizados em uma safra canavieira e os respectivos teores de carbono e nutrientes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Volume de vinhaça e quantidade de torta de filtro produzidos na safra 2020-21 e estimativas de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio, potencialmente retornados anualmente às lavouras de produção de cana-de-açúcar.

Resíduo	Volume ou quantidade	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Vinhaça	~387 ¹	10 ⁵	356	60	2035	38,6.10 ³	145,1	2,32	787,5
Torta de filtro	~ 352 ²	320	15	17,2	3,4	1.300	52,5	60,2	0,12

¹Considerando que na safra 2020-21 foram produzidos 29,7 bilhões de L de etanol com vinhaça na proporção de 13:1. ²Considerando que na safra 2020-21 foram produzidos 655 milhões de t de colmos, com mix 50:50, açúcar, etanol, e 35 kg de torta por t de cana, com 70% de umidade. ³Teores obtidos em Elia Neto e Nakahodo (1995). ⁴Teor de C na vinhaça obtido de Nunes et al. (1981). ⁵Teores obtidos em Luz e Vitti (2008).

Considerando uma lâmina de vinhaça de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, o volume gerado na safra 2020-21 seria suficiente para atender 2,6 milhões de hectares com cana; enquanto a torta de filtro aplicada em dose média de 8 t ha^{-1} (na base seca) atenderia 440 mil hectares.

Vinhaça

A vinhaça é o resíduo da destilação do etanol, amplamente utilizada como insumo para a fertirrigação agrícola da cana-de-açúcar (Figura 3), principalmente devido à sua elevada concentração de potássio; e, em menor grau, da contribuição em enxofre, cálcio, fósforo, nitrogênio e micronutrientes (Paulino et al., 2011). Sua aplicação segue planejamento agrícola-ambiental, com critérios definidos para permitir o alcance de patamares adequados de produtividade e economia na fertilização potássica. Além disso, previne contra desequilíbrios ambientais associados à salinização de áreas, à contaminação de cursos d'água e do lençol freático (Silva et al., 2007). No estado de São Paulo, a CETESB determina, por meio da Norma Técnica P.4.231, os critérios e procedimentos para a aplicação e monitoramento da vinhaça em solo agrícola (CETESB, 2015).



Foto: Nilza Patrícia Ramos

Figura 3. Aplicação de vinhaça em área de cana-soca, usando canhão em sistema carretel autopropelido.

A composição nutricional de C da vinhaça é variável não só entre unidades agroindustriais, mas, também, dentro da mesma unidade no decorrer da safra. O potássio, conforme mencionado anteriormente, é o nutriente em maior concentração, com valores entre 814 e $3.852 \text{ g K}_2\text{O m}^{-3}$ de vinhaça

(Elia Neto; Nakahodo, 1995) -média de 2.034 g K_2O m^{-3} . Ademais, o cálcio e o N se destacam com teores variando de 71 a 1.096 g Ca m^{-3} ; e 90 a 885 g N m^{-3} , respectivamente. É importante destacar que na vinhaça os nutrientes encontram-se, predominantemente, solubilizados no meio líquido e que podem ser rapidamente aproveitados pelas plantas, caso estejam sob formas inorgânicas (Barros et al., 2010). Por outro lado, as espécies químicas dissolvidas podem lixiviar para camadas mais profundas no solo e atingir o lençol freático.

Os efeitos positivos da aplicação da vinhaça na produtividade da cana-de-açúcar são amplamente relatados e podem ser verificados a curto e a longo prazo. Silva et al. (2014) verificaram aumento médio de 10,5 t de colmos ha^{-1} em áreas com solo de textura arenosa, sendo observados os melhores resultados no terceiro corte devido ao declínio promovido pela elevada extração dos nutrientes nos cortes anteriores. Num estudo de acompanhamento de 10 anos de aplicação de vinhaça, Barros et al. (2010) observaram maior disponibilidade de macronutrientes, e menor de micronutrientes até 20 cm de profundidade. O aumento no perfil de raízes também pode ser verificado nas áreas de vinhaça (Paulino et al., 2011). O aumento de biomassa disponibiliza mais restos culturais, como a palha e raízes, que contribuem para o enriquecimento da matéria orgânica em longo prazo.

De forma direta, há também entrada de C no solo pelo uso da vinhaça. Os teores de C na vinhaça variam entre 350 e 3.600 g m^{-3} , que aliado à dose aplicada no campo, pode alterar a dinâmica da matéria orgânica no sistema produtivo (Canellas et al., 2003). Entretanto, o C da vinhaça tem origem das leveduras e do mosto parcialmente fermentado, o que o torna fácil a decomposição, ou seja, uma fonte lábil de C e/ou energia para os microrganismos (Glória, 1980). A alteração da matéria orgânica pela vinhaça, dessa forma, pode não estar relacionada com o C diretamente aplicado via lâmina de vinhaça, mas sim como efeito indireto pelo aumento da atividade microbiana e melhorias no pH do solo (Doelsch et al., 2009), que incrementam a produção de biomassa e as entradas de C via planta. Benefícios diretos da aplicação da vinhaça para a matéria orgânica do solo são esperados em longo prazo, após sucessivas aplicações numa mesma área (Canellas et al., 2003). Esses autores encontraram incremento médio de 14% no teor de C do solo, até 40 cm de profundidade, com o uso continuado de vinhaça por 35 anos, aplicada anualmente em dose de 120 m^3 ha^{-1} , em área com cana-de-açúcar colhida com queima, que permite inferir sobre o efeito direto da vinhaça. A interação entre a vinhaça e a palha, entretanto, pode resultar em maior entrada de C no solo devido à adição de N no sistema e maior atividade microbiana pela fração solúvel de C, que melhora a relação C/N da palha e torna o balanço de C mais favorável à manutenção no

solo, em detrimento das perdas, como CO_2 . Em microcosmo, ao usar amostra da camada superficial de um Latossolo cultivado com cana, Yamaguchi et al. (2017) avaliaram a decomposição da palha (2, 4, 8, 16 e 24 t ha^{-1}) e o balanço de C com e sem a aplicação de vinhaça em lâmina equivalente a 200 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$. Os resultados evidenciaram que a aplicação da vinhaça aumenta a velocidade de decomposição da palha de cana e potencializa o incremento de C no solo, que chega a dobrar em relação ao tratamento sem vinhaça.

A suplementação da vinhaça com N mineral é uma prática adotada em algumas áreas de cana-soca (Schultz, 2009; Penatti, 2013), assim como a concentração do resíduo por meio da evaporação. Ambas reduzem custos operacionais de aplicação. No caso da vinhaça concentrada não se observam perdas de nutrientes, e o aproveitamento pela planta ocorre de forma semelhante ao da vinhaça *in natura* (Barbosa, 2006; Rossetto et al., 2016), com o benefício adicional do N ser mineralizado mais lentamente na vinhaça concentrada, permitindo melhor aproveitamento no tempo (Silva et al., 2013).

Recentemente, diversas usinas têm preparado fertilizantes organominerais e utilizam como matéria-prima a vinhaça concentrada ou a vinhaça *in natura* com maior concentração de K_2O superior a 2,5 kg m^{-3} , que permite menor volume de aplicação e fontes minerais. As taxas de aplicação variam de 7 a 40 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, dispostas em faixas próximas à linha de plantio. Com isso, em apenas uma operação são aplicados vinhaça e fertilizantes, simultaneamente, reduzindo custos logísticos com maior eficiência por serem aplicados de forma localizada na linha da cana.

Cabe alertar sobre a possibilidade de picos de emissão de N_2O , um importante gás de efeito estufa, quando há aplicação simultânea de vinhaça e fertilizante nitrogenado, ou mesmo a aplicação realizada separadamente, porém em curto espaço de tempo. Há relatos de aumento nas emissões de N_2O em até três vezes, devido ao N do fertilizante, ao aumento da umidade e a entrada de C orgânico facilmente oxidável pela vinhaça, que estimulam os processos de nitrificação e desnitrificação (Carmo et al., 2013; Lourenço et al., 2018a; Lourenço et al., 2018b; Lourenço et al., 2019). A estratégia de separar a aplicação de fertilizante nitrogenado e vinhaça, no tempo, foi testada em experimentos de campo no Brasil (Paredes et al., 2014; Paredes et al., 2015). A estratégia de postergar a aplicação da vinhaça *in natura* ou concentrada em cerca de 30 dias em relação à adubação nitrogenada, na maioria dos casos, resulta em baixas emissões de N_2O (Lourenço et al., 2019). Porém, nesses casos, perde-se a vantagem operacional da mistura dos fertilizantes à vinhaça.

O manejo inadequado da vinhaça no sistema de produção, com encharcamentos, escorrimentos ou doses excessivas, pode resultar em

desequilíbrios, como perdas de N ou de C do solo. Hamer et al. (2009) verificaram que os microrganismos do solo podem ser ativados pelos substratos orgânicos facilmente disponíveis, que promove maior mineralização da matéria orgânica nativa do solo, conhecido como efeito *priming*. O efeito *priming* é indesejado nos solos tropicais, que já são naturalmente pobres em matéria orgânica. Possignolo-Vitti et al. (2017) confirmaram o efeito *priming* em solos arenosos, quando utilizaram vinhaça concentrada+ureia. Numa comparação entre solos de diferentes texturas, estes autores verificaram que a decomposição da matéria orgânica da vinhaça é menor em solo argiloso que em solo arenoso, o que sugere a liberação mais rápida de nutrientes para a cana-de-açúcar. Salienta-se que o efeito *priming* dificilmente ocorre quando as boas práticas de manejo estão sendo observadas no sistema como um todo, ou seja, a manutenção da camada de palha sobre o solo, a cobertura verde, a adição de outras fontes de matéria orgânica - como a torta de filtro ou compostos agrícolas. Resultados obtidos por Rossetto et al. (2016) indicaram que a preservação da palha no manejo da cana-de-açúcar, somado à aplicação da vinhaça e da torta de filtro, aumentam os estoques de C orgânico total, e promovem melhoria nos atributos químicos do solo. No entanto, baixos níveis de palha no campo, mesmo com a aplicação de vinhaça, podem resultar em balanços negativos de C no solo, com perda gradual de parte da matéria orgânica (Yamaguchi et al., 2017).

Torta de filtro

A torta de filtro é outro importante resíduo da indústria canavieira, proveniente da filtração do caldo extraído pelas moendas no filtro rotativo (Cortez et al., 1992). É um resíduo típico do processamento da cana para a produção de açúcar; porém, as novas unidades alcooleiras também filtram o caldo, e disponibilizam maior volume deste resíduo. Produz-se, em média, entre 25 e 40 kg de torta de filtro para cada tonelada de cana moída (Rossetto et al., 2018), com sua composição química variável em função da variedade e da maturação da cana, tipo de solo, processo de clarificação do caldo, dentre outros fatores. A alta umidade é outra característica a ser destacada, que é normalmente $\geq 70\%$, o que restringe, muitas vezes, a sua aplicação às áreas próximas da unidade agroindustrial.

Na Tabela 2 observam-se valores médios e volumes gerados para este resíduo, que demonstra o potencial de uso de 3,5 milhões de toneladas, e retorna ao solo parte do N, do P e do K absorvidos pela cultura. O fósforo é o elemento mais valorizado na torta de filtro, com teores que variam entre 13,2 e 21,2 g kg⁻¹ na base seca, além da matéria orgânica (>30%) e de sua relação C:N entre 25-30 (Luz; Vitti, 2008). Estima-se que cerca de 50% do total de P aplicado via

torta esteja sob forma prontamente disponível para a cultura, o que deve ser considerado na complementação com a fonte mineral fosfatada. Há ainda o benefício de redução do P fixado no solo (Dotaniya; Datta, 2014), fenômeno que ocorre comumente nos solos tropicais intemperizados.

O seu uso é mais indicado no plantio da cana, ocasião em que a umidade do material e a presença de nutrientes oferecem boas condições para a brotação, principalmente, na época de inverno seco. Em geral, recomenda-se de 80 a 100 t ha⁻¹ em área total antes do plantio; de 20 a 35 t ha⁻¹ no caso de aplicação no sulco de plantio; e de 40 a 60 t ha⁻¹ na aplicação em soqueira, na entrelinha da cultura (doses em base úmida, com 70% de umidade). Além do fornecimento de P, o uso da torta de filtro no solo incrementa C orgânico do solo, a capacidade de troca catiônica e os teores de N, Ca e micronutrientes (Korndorfer; Anderson, 1997; Almeida Junior et al., 2011), além de aumentar o pH e reduzir o Al trocável (Rodella et al., 1990).

A compostagem da torta de filtro é uma alternativa para reduzir a umidade do resíduo e, ao mesmo tempo, aumentar seu potencial de contribuição para matéria orgânica do solo, com redução da relação C:N, aumento de compostos mais humificados e disponibilização de parte dos nutrientes, já sob forma mineral. Considera-se que a compostagem está completa quando a umidade atinge cerca de 40%, e a relação C:N por volta de 10 a 15. Neste processo pode haver o enriquecimento do composto com diversas fontes de nutrientes, como fosfatos naturais reativos, gesso e outras fontes orgânicas (esterços, lodo de esgoto, bagaço da cana, e outros) e cinzas da caldeira (Meunchang et al., 2005; Avalhães; Prado, 2009; Dinardo-Miranda et al., 2011; Vasconcelos et al., 2013). Além de aumentar o grau de humificação do material orgânico, há possibilidade de enriquecimento com outros nutrientes. Byakodie e Noorahmed (2016) salientam que, durante a compostagem há produção de enzimas, auxinas, reguladores de crescimento, aminoácidos e ácidos orgânicos, que favorecem o desenvolvimento de raízes e de pelos radiculares nas plantas.

A torta de filtro é também utilizada como base orgânica para a produção de fertilizantes organominerais. Em geral, os fertilizantes organominerais têm melhor eficiência agrônômica por apresentarem nutrientes na forma prontamente disponíveis e os nutrientes na forma orgânica, que são liberados lentamente e utilizados com maior eficiência pela cana (Souza et al., 2014; Teixeira et al., 2014; Kinpara, 2020).

Práticas de manejo e a matéria orgânica

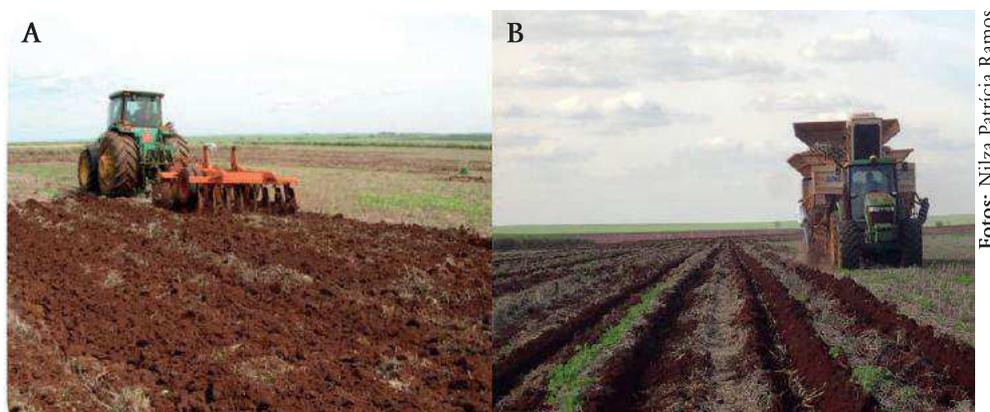
O manejo agrícola na cultura da cana-de-açúcar envolve a aplicação de um conjunto de técnicas/práticas de produção que se inicia com sistematização do

terreno, práticas de conservação do solo, preparo das mudas, preparo do solo, plantio, adubação, controle fitossanitário e colheita. A seleção da técnica a ser adotada depende, essencialmente, das necessidades da cultura, das condições edafoclimáticas e, também, da disponibilidade de máquinas e equipamentos. Na sequência são apresentadas as principais práticas que impactam no conteúdo e/ou qualidade da matéria orgânica do solo na cultura da cana-de-açúcar.

Preparo do solo

O preparo do solo envolve técnicas de revolvimento das camadas superficiais para o controle das plantas daninhas e, principalmente, para romper camadas compactadas do solo, que melhoram as condições físicas para o crescimento das raízes e o armazenamento de água. Ademais, se destina à incorporação de corretivos, como calcário e gesso, ou fertilizantes minerais e orgânicos necessários para o restabelecimento dos nutrientes extraídos ao longo dos ciclos de corte (Rossetto et al., 2008).

Ao mesmo tempo em que o preparo do solo pode romper camadas compactadas, há também a destruição de agregados do solo e conseqüente exposição de parte da matéria orgânica à ação oxidativa a cargo dos microrganismos do solo (De Luca et al., 2008). Essa quebra da proteção física da matéria orgânica, previamente protegida no interior dos agregados, resulta em liberação de C na forma de CO_2 (Schwartz et al., 2010), que deixa o sistema solo, e pode significar redução significativa do C estocado ao longo do tempo. Diferentes técnicas e conjunto de operações podem ser adotados no preparo do solo (Figura 4), o que também tem impacto maior ou menor na matéria orgânica no C estocado nesse compartimento (La Scala et al., 2006).



Fotos: Nilza Patrícia Ramos

Figura 4. Preparo de solo convencional com grade (A) e plantio direto com plantadora de cana-de-açúcar (B).

Um bom preparo do solo não significa, porém, uma mobilização intensa e profunda do solo. Isso, durante algum tempo, 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, de plantio direto (Tavares et al, 2010; Carvalho et al., 2011). Logicamente, o preparo visa oferecer condições para o bom desenvolvimento do sistema radicular e é indicado para reduzir o efeito de impedimentos físicos, como compactação, químicos com alta acidez em camadas subsuperficiais, que necessitam de incorporação de corretivos, ou mesmo para a eliminação de problemas fitossanitários, como a presença de pragas de solo. A adoção de práticas conservacionistas, com o mínimo revolvimento do solo, é indicada para solos que não apresentam esses impedimentos e é recomendada como meta a médio/longo prazo para todos os demais solos.

O preparo convencional do solo, geralmente, implica na maior exposição da matéria orgânica aos fatores que regulam a decomposição do material. Essa maior exposição pode resultar em elevadas perdas de C do solo na reforma do canavial, quando num curto espaço de tempo, de quatro semanas, pode-se perder o equivalente a 30% do C ($2,7 \text{ t ha}^{-1}$) estocado na palha antes da reforma (La Scala et al., 2006. Dessa forma, reduz a efetividade na captura e estocagem de C no solo e, conseqüentemente, impacta de forma negativa o desempenho ambiental da cultura e de seus produtos derivados. Cabral et al. (2016) observaram valores da ordem de $1,7 \text{ t ha}^{-1}$ de C emitidos no período de seis semanas, após a reforma convencional do canavial, o que representou o equivalente a 4% do C estocado na camada 0-20 cm, de um Latossolo com 75% de argila. Outros resultados, porém, indicam que o preparo do solo na reforma do canavial compromete de 80% a 100% do C que seria estocado anualmente no solo pela manutenção da palha de cana, a depender da textura do solo (La Scala et al., 2012).

O preparo reduzido solo (Figura 4A), tende a reduzir as perdas de C no momento da reforma do canavial, podendo-se manter o dobro de C no sistema, comparativamente ao preparo convencional (Segnini et al., 2013). Destacando que, as respostas devem variar com a textura do solo, a existência ou não de camadas compactadas, e o histórico de uso da terra. Por exemplo, no trabalho de Farhate et al. (2022), em área de expansão da cultura da cana-de-açúcar sob solo de textura média (74% de areia), com avaliação da cana-planta e primeira soqueira, os preparos mínimos, reduzido e convencional do solo, proporcionaram respostas semelhantes de produtividade da cana, que superaram 100 t ha^{-1} . No caso de áreas consolidadas de produção de cana-de-açúcar e duas situações de textura do solo, média e argilosa, o preparo reduzido

associado ao uso de *Crotalaria juncea*, na reforma do canavial, proporcionou melhores condições físico hídricas do solo, traduzidas por meio de índices de qualidade relacionados com a porosidade estrutural e a umidade que resulta em baixa resistência mecânica ao crescimento radicular (Farhate et al., 2018). Outras opções como o preparo profundo canteirizado e o controle de tráfego, com o preparo somente na linha de plantio, são alternativas para a manutenção de maior capacidade de suporte de carga (Guimarães Júnnyor, 2018) e melhor qualidade física para o desenvolvimento radicular (Lima, 2016). Dessa forma, é perceptível que o preparo reduzido é viável sob a ótica da qualidade física do solo, e maior fração da matéria orgânica do solo mantém preservada.

Uso de plantas de cobertura na reforma do canavial

O cultivo de plantas de cobertura, especialmente leguminosas, é uma alternativa promissora para o incremento da matéria orgânica do solo, inclusive em áreas de reforma de cana-de-açúcar (Ambrosano et al., 2011; Ambrosano et al., 2013). O uso de espécies com capacidade de rápido acúmulo de biomassa, associado às elevadas concentrações de nitrogênio, absorvido via associação simbiótica com bactérias fixadoras de N_2 biológico (Perin et al., 2004), são as mais utilizadas, destacando-se, dentre estas, as crotalárias. Da mesma forma, merece destaque aquelas com sistema radicular profundo, que recuperam os nutrientes no perfil do solo, trazendo-os para as camadas mais superficiais por meio da ciclagem biogeoquímica.

A elevada concentração de N, comum nas leguminosas, contribui para uma estreita relação C:N em sua biomassa, comparativamente às plantas de outras famílias. Além disso, há a presença significativa de compostos solúveis que favorecem, ainda mais, o processo de decomposição destes materiais e sua ciclagem de C e de nutrientes para as culturas subsequentes (Miyasaka et al., 1984). Neste sentido, várias espécies podem ser citadas com potencial de uso (Tabela 3), destacando-se, em produção de biomassa seca da parte aérea, a crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), seguida do guandu (*Cajanus cajan*) e da mucuna-preta (*Mucuna pruriens*). O amendoim não possui biomassa expressiva, mas tem a vantagem adicional de comercialização dos grãos. As informações de contribuição da biomassa de raízes ainda são escassas, merecendo mais atenção por parte dos especialistas em pesquisas futuras.

Tabela 3. Biomassa e teores de carbono e nitrogênio em leguminosas com potencial de uso em áreas de reforma de canavial.

Espécie	Matéria seca da parte aérea	C	N	C:N	Massa seca de raízes	Referências
	— t ha ⁻¹ —	— g kg ⁻¹ —			— t ha ⁻¹ —	
<i>Crotalaria juncea</i>	6,5		21			Alcântara et al. (2000)
<i>Crotalaria juncea</i>	9,3		35			Perin et al. (2004)
<i>Crotalaria juncea</i>	17,9		18	25		Duarte Junior e Coelho (2008)
<i>Crotalaria juncea</i>	9,3	449	23	20	1,0	Ambrosano et al. (2011)
<i>Crotalaria juncea</i>	9,0					Prellwitz e Coelho (2011)
<i>Crotalaria juncea</i>	5,7	450	19	23		Marcelo et al. (2012)
Mucuna-preta	4,1	446	42	11	0,2	Ambrosano et al. (2011)
Mucuna-preta	10,1		22	15		Duarte Junior e Coelho (2008)
Amendoim	2,0	432	24	20	0,8	Ambrosano et al. (2011)
Guandu	13,2		24	15		Alcântara et al. (2000)
Guandu	4,1	473	24	20		Marcelo et al. (2012)
Milheto	7,1		14	30		Perin et al. (2004)
Milheto	6,8	458	15	33		Marcelo et al. (2012)
Milheto	8,9		13			Crusciol e Sorato (2007)
Braquiária	6,3		19			Crusciol e Sorato (2007)

A *Crotalaria juncea* (Figura 5) é recomendada para cultivo em áreas de reforma da cana-de-açúcar (Ambrosano et al., 2011), pois aporta elevados valores de biomassa na área sob reforma, que varia entre 5,7 a 17,9 t ha⁻¹, com relação a C:N de 20 a 25 (Tabela 3), muito favorável a mineralização do N, cujo aporte total na massa fica entre 103 a 627 kg N ha⁻¹. De forma simples, pode-se estimar a entrada de C no solo a partir da biomassa de crotalaria, utilizando, para isso, a relação C/N favorável à decomposição (≤ 30) e a estequiometria da respiração aeróbia, em que 1/3 do C é incorporado na biomassa microbiana e ficaria passível de estabilização. A partir desses pressupostos e considerando um teor de 449 g C kg⁻¹ na biomassa, haveria potencial para o sequestro de 0,8 a 2,7 t C ha⁻¹, o que é expressivo para um único cultivo.

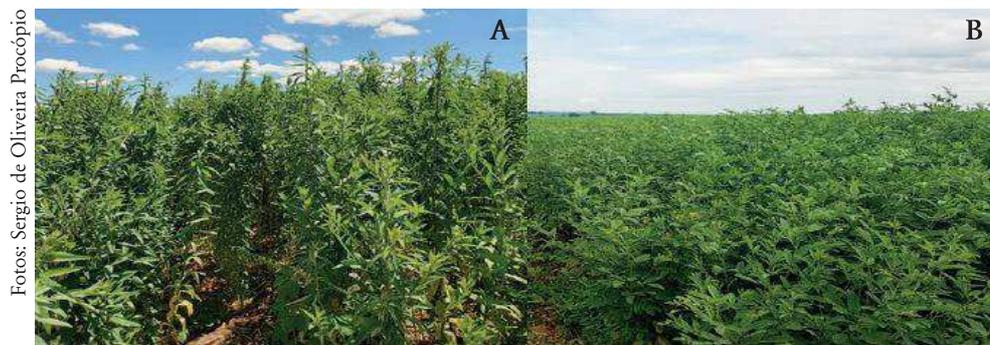


Figura 5. Aspecto visual da *Crotalaria juncea* (A) e do feijão guandu (B).

A relação C:N favorável das leguminosas para sistema de produção de grãos é evidenciada por Costa et al. (2008), que afirmam que a entrada destes materiais favorece, significativamente, o acúmulo de N no solo e, que, para acumular 1,0 t de C é necessário acumular aproximadamente 0,08 t de N. Portanto, o C só se acumula na presença do N e, segundo estes autores, isto é válido para as situações de uso de leguminosas como adubos verdes, não sendo válido no caso da soja, cujo N fixado biologicamente, sai do sistema, em grande parte, quando há a colheita dos grãos.

O acúmulo de N nas plantas fixadoras de N se deve, em parte, ao N mineral já presente no solo, que pode ser recuperado em maiores profundidades pelas raízes, e principalmente, pela eficiência fixadora de N das bactérias em associação com as plantas (Urquiaga; Zapata, 2000). Estima-se que de 57 a 69% do total de N na planta de crotalaria juncea seja proveniente da fixação biológica de N (Perin et al., 2004; Ambrosano et al., 2011).

É inegável o impacto positivo das plantas de cobertura no sistema de produção da cana, com respostas positivas da cana cultivada na sequência (Ambrosano et al., 2011) ou melhorias de solo (Alcântara et al., 2000). Porém, hoje se discute também a emissão de parte do N da biomassa na forma de N_2O , que ocorreria após o manejo para o plantio da cana, em função da mineralização do N (nitrificação) e da redução do nitrato em condições de anaerobiose (desnitrificação). O IPCC (2019) sugere que 0,6% do N presente nos restos culturais é perdido na forma de N_2O , com um impacto negativo na contabilidade de C do sistema de produção e no potencial da cana para mitigar as mudanças climáticas globais. Valores específicos para o Brasil ainda são escassos e podem ser inferiores ou não ao valor *default* do IPCC, conforme mostrado no trabalho de Gomes et al. (2009), em que o fator de emissão de N_2O foi equivalente a 0,4% - 0,7% do N presente nas plantas de cobertura avaliadas (aveia preta, labe-labe, feijão caupi, ervilhaca

e guandu), sob condição climática subtropical do Rio Grande do Sul. Em outro trabalho, também no Rio Grande do Sul, o fator de emissão de plantas de cobertura usadas no verão, que incluíam crotalárias juncea e spectabilis, alcançou 0,8% do N contido na biomassa manejada e não foi proporcional ao N aportado pelas plantas (Weiler, 2012).

Algumas gramíneas apresentam potencial de uso como culturas de cobertura, por produzirem elevada biomassa de parte aérea e, especialmente, raízes. Na produção de grãos são diversas as espécies já utilizadas nos períodos de entressafra. O milho e a braquiária se destacam com médias de produção de biomassa bastante variadas. Na Tabela 3 são apresentados alguns valores, mas a literatura é vasta no relato destas espécies (Perin et al., 2004; Crusciol; Sorato, 2007; Marcelo et al., 2012). A biomassa da parte aérea das gramíneas tem relação C:N superior à das leguminosas, mas ainda bastante favorável à decomposição, que inclusive pode ser usada em consórcio com leguminosas. O uso em sistemas com cana-de-açúcar ainda é incipiente, mas pode-se realizar um aprendizado ou adaptação de manejo a partir das informações disponíveis para outros sistemas de produção (grãos, na entrelinha de espécies perenes, como citros, entre outros).

Adubação

A estratégia atual de adubação está voltada para uma agricultura mais sustentável, englobando quatro aspectos principais que são: o bom desenvolvimento do sistema radicular, maior longevidade do canavial, aumento da matéria orgânica do solo (Rossetto et al, 2008) e maior participação de insumos biológicos, em detrimento do uso de insumos sintéticos.

A adubação mineral é recomendada para fornecer os nutrientes necessários à obtenção de altas produtividades, repondo os nutrientes extraídos e exportados pelos colmos na seguinte ordem: potássio > cálcio > magnésio > nitrogênio > fósforo > micronutrientes. A Tabela 4 traz um panorama geral das quantidades de nutrientes exportadas do campo com os colmos. Os teores propostos se basearam em Gomes (2003) e Oliveira et al. (2010) com o estudo de 12 e 11 variedades de cana-de-açúcar, respectivamente, sendo o trabalho dos últimos autores realizados sob condição de irrigação. Verifica-se que as quantidades exportadas de nutrientes são utilizadas como uma das bases para a recomendação de adubação para cana. Assim, são necessários 0,5 a 1,4 kg de N; 0,06 a 0,3 kg de P e 0,8 a 3,6 kg de K por tonelada de colmos. A recomendação de adubação para o estado de São Paulo considera também a análise do solo e a expectativa de produtividade, além do fator de eficiência de absorção dos nutrientes (Raij et al., 1997).

Tabela 4. Teores de carbono e nutrientes presentes no colmo e estimativas de quantidades exportadas.

Nutriente	Teor no colmo ¹	TCH 98 ³	TCH 76 ⁴
	— kg t ⁻¹ —	— kg ha ⁻¹ —	
C ²	449	44.002	34.124
N	0,5 a 1,41	49 a 139	38 a 107
P	0,06 a 0,29	6 a 28	5 a 22
K	0,86 a 3,60	84 a 353	65 a 274
Ca	0,92 a 1,52	90 a 149	70 a 106
Mg	1,09 a 1,52	107 a 149	83 a 116

¹Teores obtidos a partir de estudo com 12 variedades (Gomes, 2003) e 11 variedades (Oliveira et al., 2010);

²Teor determinado a partir de 1.077 amostras de colmos analisadas no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental - LBA da Embrapa Meio Ambiente; ³TCH 98 a partir da média da Tabela 1 e ⁴TCH76 a partir da média nacional de CONAB (2021ab). TCH = toneladas de cana por hectare.

O trio NPK sempre foi o mais observado pelos produtores para a aplicação de fertilizantes, seguidos do Ca e do Mg, geralmente corrigidos com a calagem. Entretanto, este cenário vem se modificando ao longo dos anos, com o desenvolvimento de pesquisa e a divulgação de resultados de respostas à adubação com micronutrientes. Alguns resultados evidenciam ganhos na produtividade de colmos entre 9 e 18 t ha⁻¹ com a aplicação dos micronutrientes Zn, Mo, Mn, Cu e B (Mellis et al., 2016).

O uso de insumos biológicos, como bactérias promotoras de crescimento, mineralizadoras de nutrientes, associadas ou não com a adubação mineral, também vem crescendo. Esses inoculantes atuam fixando N₂ atmosférico nas plantas, produzindo fitohormônios e enzimas, como a ACC-deaminase, mineralizando nutrientes, recuperando parte do P fixado em argilas, solubilizando fosfatos no solo, e aumentando a absorção das raízes (Lazarovits; Nowak, 1997). Todos esses benefícios, bem como a promoção de um manejo nutricional equilibrado e suficiente para a cultura, tendem a promover boa produção de biomassa da parte aérea e raízes, que contribuirão para a manutenção ou aumento dos teores de matéria orgânica do solo. Considerando que a principal via de entrada de C no sistema edáfico é a planta, todas as práticas e estratégias que aumentem a produtividade devem contribuir também para o incremento do C ou matéria orgânica do solo.

No caso dos inoculantes e microrganismos benéficos, cabe destacar que a recomendação de uso ainda está em desenvolvimento para cana-de-açúcar, pois a experiência mostra que há grande interação entre os inoculantes e

as variedades, que determinam o grau de resposta da cultura em termos de produtividade de colmos, biomassa ou açúcar (Schultz et al., 2012).

A aplicação de resíduos agroindustriais como vinhaça e torta de filtro também contribuem positivamente para o retorno dos nutrientes ao solo. Cabe destacar que seu uso ocorre em áreas significativas de produção canavieira. A abrangência de aplicação depende do raio médio economicamente viável para o retorno destes resíduos em campo, que tem aumentado nos últimos anos frente ao interesse pela sustentabilidade. Vale salientar que os produtores independentes (fornecedores de cana, por exemplo) não têm acesso aos resíduos agroindustriais, ficando a adubação dependente de fertilizantes minerais.

Neste item, não há pretensão de se fazer recomendações sobre adubação, o intuito é alertar sobre a necessidade de reposição de nutrientes exportados para manutenção da produtividade e qualidade do solo, evitando o comprometimento do sistema produtivo.

Colheita

Historicamente, a colheita da cana-de-açúcar era realizada de forma manual, com o uso do fogo para a despalha (Figura 6A), facilitando o corte dos colmos (De Luca et al., 2008). Com a entrada em vigor do decreto de Lei Paulista 47.700, de 11 de março de 2003 (ALSP, 2003), foram determinados prazos para a eliminação gradativa do emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais paulistas, que foram antecipados com a assinatura do Protocolo Agroambiental, em 2007, trazendo consigo o uso da colheita sem queima ou de cana-crua. Atualmente, 94% da colheita de cana nacional é realizada mecanicamente (CONAB, 2017).

Fotos: Antônio Dias Santiago e Nilza Patrícia Ramos



Figura 6. Vista geral da colheita manual da cana-de-açúcar com despalha a fogo e a superfície do solo após a colheita (A); e da colheita mecânica da cana-de-açúcar, deixando o solo coberto com a palha (B).

A colheita é a operação responsável pela devolução das folhas, bainhas, ponteiros e alguns pequenos pedaços de colmo ao solo, formando a palha (Figura 6B), palhiço ou palhada (Souza et al., 2005). A quantidade de palha deixada sobre o solo depende da variedade e da produtividade. Com a transição do sistema de cana queimada para a cana-crua, colhida mecanicamente, verificaram-se incrementos na matéria orgânica do solo, relativos à manutenção da palha, variando a depender da textura do solo e das condições de temperatura e umidade (Ball Coelho et al., 1993; Souza et al., 2005). Em uma transição de três anos de área com colheita queimada para cana-crua, De Lucca et al. (2008) observaram ganhos da ordem de 1,60 e 1,35 t ha⁻¹ de C, respectivamente, para solos de textura argilosa e arenosa, na camada 0-20 cm, que representaram ganhos de 11% e 9% em relação ao carbono inicial.

A queima para a colheita mantém o solo descoberto durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar, o que promove perdas de matéria orgânica

por erosão (Dominy et al., 2002). Esta perda é potencializada em função da menor estabilidade de agregados, característica de ambientes com menores aportes de C e de N (Feller; Beare, 1997), o que retroalimenta o empobrecimento do sistema.

O entendimento a respeito da transição entre cana queimada e cana crua foi determinante para fortalecer a importância da manutenção da palha na superfície do solo no sistema canavieiro. Com mais de uma década do processo de encerramento da queima, o desafio técnico foi quantificar os benefícios a curto e a longo prazo desta deposição freqüente e a possibilidade de recolhimento parcial desse material. O recolhimento total ou parcial da palha é motivado pelo potencial para produção de bioeletricidade, a partir da queima em caldeiras, e/ou etanol, a partir de processo lignocelulósico (Leal et al., 2013), conhecido como etanol de segunda geração ou 2G. Este potencial de uso fora de campo depende, além de questões ligadas à viabilidade e competitividade econômica, aos efeitos dessa retirada total ou parcial da palha do campo, ou seja, da compreensão dos impactos da palha na produção e sustentabilidade da cultura.

Ainda não há consenso a respeito da quantidade de palha que poderia ser retirada do campo com a manutenção dos efeitos positivos na qualidade do solo e rendimento de colmos e/ou açúcar. Vários estudos apontam para maiores riscos de perdas de produção de colmos com recolhimento parcial da palha em ambientes com estresse hídrico mais pronunciado (Marin et al., 2014; Oliveira et al., 2016; Carvalho et al., 2017b), em que a palha funcionaria como um colchão protetor contra a perda excessiva de umidade do solo, sem efeito pronunciado em áreas menos sujeitas ao estresse hídrico, como as regiões Central e Leste de São Paulo. No curto prazo, entende-se que o maior benefício é mesmo físico, pois a entrada de nutrientes vindas da decomposição é pouco aproveitada pela planta e, a longo prazo, tem-se o enriquecimento do solo com matéria orgânica (Trivelin et al., 2013; Carvalho et al., 2017b).

Em longo prazo, os efeitos da retirada da palha podem ser desfavoráveis, principalmente em condições de textura arenosa (De Lucca et al., 2008) em que a decomposição da biomassa residual pode ser mais acelerada. Tenelli et al. (2021) verificaram perdas entre 1,5 e 2,3 t C ha⁻¹ ano⁻¹ com a remoção parcial de níveis crescentes de palha, demonstrando a fragilidade destes ambientes.

Considerações finais

A manutenção da produção de cana-de-açúcar, mesmo em áreas continuamente cultivadas com a cultura, como ocorre, por exemplo, nos municípios paulistas de Piracicaba e Cosmópolis, que há mais de 150 anos suportam a cultura,

parece se alicerçar no manejo dos restos culturais e dos resíduos agroindustriais que retornam ao solo a cada safra, ciclando nutrientes e matéria orgânica. Essa importância é evidenciada nas Tabelas 5 e 6 em que o sistema completo, com simulação de entradas de restos culturais e resíduos agroindustriais (comum em áreas próprias de usinas) é altamente positivo, seguido pelo sistema com aporte apenas de restos culturais (comum em fornecedores), que também tem balanço positivo, descontando-se a exportação via colmos. Num contraponto, o sistema com uso exclusivo de fertilizantes minerais, sem a ciclagem via palha e/ou via resíduos da agroindústria, mostra balanço negativo tanto na parte nutricional, como no que se refere à estabilização de carbono no solo.

Tabela 5. Balanço dos macronutrientes em sistema de produção de cana-de-açúcar com e sem a contribuição de entradas orgânicas.

	PC ¹	TF ²	V ³	Palha ⁴	Raízes ⁵	EO ⁶	EMI ⁷	Exportação via colmos ⁸	Balanço EO + EM	Balanço mineral
Cana-planta com adição de resíduos agroindustriais										
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹										
N	312	120	53	-	-	485	40	94	+431	-54
P	29	61	4	-	-	94	66	17	+143	+49
K	214	23	256	-	-	493	125	219	+399	-94
Soca com adição de resíduos agroindustriais										
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹										
N	-	120	53	62	30	265	80	73	+272	+7
P	-	61	4	17	16	82	-	14	+68	-14
K	-	23	256	90	?	369	83	170	+282	-87
Cana-planta sem adição de resíduos agroindustriais										
N	312	-	-	-	-	312	40	94	+258	-54
P	29	-	-	-	-	29	66	17	+78	+49
K	214	-	-	-	-	214	125	219	+120	-94
Soca sem adição de resíduos agroindustriais										
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹										
N	-	-	-	62	30	92	80	73	+99	+7
P	-	-	-	17	16	33	-	14	+19	-14
K	-	-	-	90	?	90	83	170	+3	-87

¹Planta de cobertura = Leguminosa crotalária, com aporte médio de 11,8 t ha⁻¹ de biomassa, teor médio de N-P-K de 26,5-2,44-18,1 g kg⁻¹, respectivamente, baseados nas médias da Tabela 3 e outros autores. ²Torta de filtro dose proposta 8 t ha⁻¹, com teores (Tabela 2) de N-P₂O₅-K₂O de 320-15-17, 2-34 g kg⁻¹, sendo K=0,83*K₂O e P=0,44*P₂O₅. ³Vinhaça dose proposta -150 m³, com teores (Tabela 2) C=10% e N-P₂O₅-K₂O de 60-203 g kg⁻¹, sendo K=0,83*Na₂O e P=0,44*P₂O₅. ⁴Palha com aporte médio de 12,26 t ha⁻¹ de biomassa (Tabela 1), teor médio de N-P-K de 5-1,35-7,4 g kg⁻¹, respectivamente, baseados na Tabela 1 e em Ramos et al. (2016); Menandro et al. (2017). ⁵Raízes com aporte médio de 2,69 t ha⁻¹ de biomassa, teor médio de N-K de 11,2-7,4 g kg⁻¹, respectivamente, baseados nas médias Tabela 1 e outros autores. ⁶Entrada Orgânica = Planta de Cobertura + Torta de Filtro + Vinhaça + Palha + Raízes. ⁷Entrada via adubação mineral. ⁸Exportação do colmo baseada nas estimativas da Tabela 2, considerando o TCH 98 para cana-planta e o TCH 76 para a soca.

Tabela 6. Valores estimados de aporte de carbono, de carbono estabilizado e de balanço de carbono em função de diferentes compartimentos do sistema de produção (planta de cobertura, resíduos agroindustriais, palha e raízes).

Manejo	PC ¹	TF ²	V ³	Palha ⁴	Raízes ⁵	Total
Cana-planta com adição de resíduos agroindustriais						
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹						
C aportado	5.300	2.560	15.000	0	0	22.860
C estabilizado no solo	1.800	900	0	0	0	2.700
Soca com adição de resíduos agroindustriais						
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹						
C aportado	0	0	15.000	5.700	1.112	21.812
C estabilizado no solo			0	630	363	993
Balanço do C fixado 5 cortes com resíduos agroindustriais (cana-planta + 4 socas)						6.762
Cana-planta sem adição de resíduos agroindustriais						
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹						
C aportado	5.300	0	0	0	0	5.300
C estabilizado no solo	1.800	0	0	0	0	1.800
Soca sem adição de resíduos agroindustriais						
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹						
C aportado	0	0	0	5.700	1.112	6.812
C estabilizado no solo			0	630	363	993
Balanço do C fixado 5 cortes sem resíduos agroindustriais (cana-planta + 4 socas)						5.772

¹Planta de cobertura: crotalária, com aporte médio de 11,8 t ha⁻¹ de biomassa, teor médio de C de 449g kg⁻¹. ²Torta de filtro: dose considerada igual 8 t ha⁻¹, teor médio de C de 320 g kg⁻¹. ³Vinhaça: lâmina considerada igual a 150 m³ ha⁻¹, com teor médio de C de 10%. ⁴Palha: aporte médio de 12,2 t ha⁻¹ e teor de C igual a 465 g kg⁻¹. ⁵Raízes: aporte médio de 2,69 t ha⁻¹ de biomassa e teor de C de 415 g kg⁻¹.

O valor negativo do sistema com base, exclusivamente, no aporte mineral sem manutenção da palha em campo, indica que para se atingir a produtividade almejada o produtor necessita aplicar maiores doses de fertilizantes, o que pode se tornar insustentável em longo prazo, tanto sob o ponto de vista econômico como ambiental. Por outro lado, o manejo com a entrada de nutrientes e C via plantas de cobertura, restos culturais e resíduos agroindustriais não garante, por si só, que o enriquecimento da matéria orgânica e dos estoques de C do solo alcançados ao longo dos cortes da cana-de-açúcar, vá se manter após a reforma com preparo intensivo do solo ou com o uso de outras práticas agrícolas desfavoráveis. Esta garantia só será alcançada com a adoção combinada das práticas agrícolas, não só as citadas neste capítulo de como outras que sejam favoráveis ao aumento e a manutenção da matéria orgânica do sistema.

Com o início do processo de valorização de produtos obtidos a partir de sistemas sustentáveis (ex. a política RenovaBio), muitos produtores voltaram seu olhar para as emissões de gases de efeito estufa e para os estoques de C do solo de seus sistemas produtivos. Outras iniciativas estão se abrindo no mercado internacional e talvez, num futuro não muito

distante, a agricultura passe a receber pelos benefícios ambientais que o sistema sustentável pode vir a oferecer, ao invés de pagar por impactos negativos que sistemas insustentáveis promovem.

Referências

- ALCÂNTARA, F. A.; FURTIN NETO, A. E.; PAULA, M. B.; MESQUITA, H. A.; MUNIZ, J. A. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um latossolo vermelho-escuro degradado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, p. 277-288, 2000.
- ALSP - ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decreto nº 47.700 Regulamenta a Lei nº 11.241 sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas, 2003. Acesso em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2003/decreto-47700-11.03.2003.html>.
- AMBROSANO, J. A.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A.; DIAS, F. L. F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; SACHS, R. C. C.; ZACÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. *Bragantia*, v. 70, p. 810-818, 2011.
- AMBROSANO, J. A.; CANTARELLA, H.; ROSSI, F.; SCHAMMAS, E. A.; SILVA, E. C.; AMBROSANO, G. M. B.; DIAS, F. L. F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T. Desempenho de adubos verdes e da primeira soqueira de cana-de-açúcar, cultivados consorciadamente. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 8, p. 80-90, 2013.
- AVALHÃES, C. C.; PRADO, R. M. Compostagem de resíduos da indústria sucroalcooleira enriquecidos com fontes alternativas de fósforo. *Nucleus*, v. 6, p. 271-84, 2009.
- BALL-COELHO, B.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in Northeastern Brazil. *Agronomy Journal*, v. 85, p. 1004-1008, 1993. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500050009x>.
- BARBOSA, L. C.; SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; ROSSI-NETO, J.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional*, v. 13, p. 15-25, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.03.002>.
- BARBOSA, V. Novas tecnologias no uso da vinhaça e aspectos legais. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; AZANIA, A. A. P. M.; TASSO JR, L. C.; NOGUEIRA, G. A.; VALLE, D. W. *Tópicos em tecnologia sucroalcooleira*. Jaboticabal: Multipress, p. 141-150, 2006.
- BARROS, R. P.; 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*, v. 40, p. 341-346, 2010.
- BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA JR, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy of Sustainable Development*, v. 38, Article 13, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>.
- BORDONAL, R. O.; MENANDRO, L. M. S.; BARBOSA, L. C.; LAL, R.; MILORI, D. M. B. P.; KOLLN, O. T.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Sugarcane yield and soil carbon response to straw removal in South-central Brazil. *Geoderma*, v. 328, p. 79-90, 2018b.
- BOSCHIERO, B. N.; CASTRO, S. G. Q.; ROCHA, A. E. Q.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N.; SORIANO, H. L.; SANTOS, J. A.; BRESSIANI, J. A.; KÖLLN, T. Biomass production and nutrient removal of energy cane genotypes in Northeastern Brazil. *Crop Science*, v. 59, p. 379-381, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.07.0458>.
- BYAKODI, A. S.; NOORAHMED, A. H. A Review on different composting techniques using waste sugar cane and pressmud mixtures. *International Journal of Scientific Development and Research*, v. 1, p. 154-158, 2016.
- CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A.; RAMOS, N. P.; PACKER, A. P. C.; BATISTA, E. R. Fluxes of CO₂ above sugarcane plantation in Brazil. *Agricultural and Forestry Meteorology*, v. 182-183, p. 54-56, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.08.004>.
- 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.
- CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v. 27, p. 935-944, 2003.

- CARMO, J. B. D.; FILOSO, S.; ZOTELLI, L. C.; SOUSA NETO, E. R.; PITOMBO, L. M.; DUARTE-NETO, P. J.; VARGAS, V.P.; ANDRADE, C.A.; GAVA, G. J. C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H.; ELIA-NETO, A.; MARTINELLI, L. A. In field greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: Effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*, v. 5, p. 267-280, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x>.
- CARVALHO, L. A.; SILVA JUNIOR, A. A.; NUNES, W. A. G. A.; MEURER, I.; SOUZA JÚNIOR, W. S. Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no Centro-oeste do Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 34, p. 200-211, 2011.
- CARVALHO, J. L. N., OTTO, R., FRANCO, H. C. J., TRIVELIN, P. C. O. Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. *Scientia Agricola*. v. 70, p. 336-344, 2013.
- CARVALHO, J. L. N.; HUDINBURG, T. W.; FRANCO, H. J.; LUCIA, E. Contribution of above and below ground bioenergy crop residues to soil carbon. *Global Change Bioenergy*, v. 9, p. 1333-1343, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12411>.
- CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIRO, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implication of sugarcane straw removal: a major review. *Global Change Bioenergy*. v. 9, p. 1181-1195, 2017b. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>.
- 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. Special issue: soil organic matters. *European Journal of Soil Science*. v. 62, p. 23-28, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01315.x>.
- CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria Nº 045/2015/C: Norma Técnica P4.231: Vinhaça - Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. 3.ed, 2. versão, 15 p., 2015.
- CHERUBIN, M. R.; LISBOA, I. P.; SILVA, A. G. B.; VARANDA, L. L.; BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; OTTO, R.; PAVINATO, P. S.; SOLTANGHEISI, A.; CERRI, C. E. P. Sugarcane straw removal: implications to soil fertility and fertilizer demand in Brazil. *Bioenergy Research*, v. 12, p. 888-900, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10021-w>
- 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. Série histórica da safra de cana-de-açúcar: Agrícola. Brasília, DF, 2021a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 20 jan. 2022a.
- CONAB. Série histórica da safra de cana-de-açúcar: Indústria. Brasília, DF, 2021b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 20 jan. 2022b.
- CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. *Revista Brasileira de Energia*, v. 2, p. 1-17, 1992.
- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 323-332, 2008
- CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P. Nutrição e produtividade do amendoim em sucessão ao cultivo de plantas de cobertura no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, p. 1553-1560, 2007.
- DE LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavieira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 789-800, 2008.
- DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIEKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica dos solos. In: MELO, V. F.; ALEONI, L. R. F. (ed.) *Química e Mineralogia dos solos. Parte II. Aplicações*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 1-68.
- DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C.; LANDEL, M. G. A. *Cana de açúcar*. Campinas: Instituto Agronômico, 2010. 882 p.
- DOELSCH, E.; MASON, A.; CASEVIELLE, P.; CONDOM, N. Spectroscopic characterization of organic matter of a soil and vinasse mixture during aerobic or anaerobic incubation. *Waste Management*, v. 29, p. 1929-1935, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.009>.
- DOMINY, C. S.; HAYNES, R. J.; ANTWERPEN, R. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. *Biology and Fertility of Soils*, v. 36, p. 350-356, 2002.
- DOTANIYA, M. L.; DATTA, S. C. Impact of bagasse and press mud on availability and fixation capacity of phosphorus in an Inceptisol of north India. *Sugar Tech*, v. 16, p. 109-112, 2014.
- DUARTE JR, J. B.; COELHO, F. C. Adubos verdes e seus efeitos no rendimento da cana-de-açúcar em sistema de plantio direto. *Bragantia*, v. 67, p. 723-732, 2008.

- ELIA NETO, A.; NAKAHODO, T. Caracterização físico-química da vinhaça - projeto n. 9500278. **Relatório Técnico da Seção de Tecnologia de Tratamento de Águas do Centro de Tecnologia Copersucar**, Piracicaba, 1995. 26 p.
- ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; LOVERA, L. H.; LIMA, L. S.; OLIVEIRA, I. N.; RIBEIRO, N. P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 60-71, 2019.
- FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; SOUZA, A. C. M.; CAMPOS, M. C. C.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality in sugarcane field under cover crop and different soil tillage systems. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, p. 489-500, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n11p489>.
- FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M.; CHERUBIN, M. R.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; LA SCALA JÚNIOR, N. Soil physical change and sugarcane stalk yield induced by cover crop and soil tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0210123, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210123>.
- FARONI, C. E. **Sistema radicular da cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems. **Geoderma**, v. 79, p. 49-67, 1997.
- 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, p. 859-866, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12292>.
- FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônômico no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 31-44.
- FIGUEIREDO, E. B.; LA SCALA JR, N. GREENHOUSE GAS BALANCE DUE TO THE CONVERSION OF SUGARCANE AREAS FROM BURNED TO GREEN HARVEST IN BRAZIL. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 141, p. 77-85, 2011.
- FORTES, C.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of nitrogen from sugarcane harvest residues and urea for crop nutrition. **Scientia Agricola**, v. 70, p. 305-312, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000100012>.
- FRANCO, H. C. J.; VITTI, A. C.; FARONI, C. E.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Stock of nutrients in crop residues incorporated to the soil during renovation of sugarcane areas. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 25, p. 32-36, 2007.
- FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, v. 67, p. 579-590, 2010.
- FRANCO, H. C. J.; PIMENTA, M. T. B.; CARVALHO, J. L. N.; MAGALHÃES, P. S. G.; ROSSELL, C. E. V.; BRAUNBECK, O. A.; VITTI, A. C.; KÖLLN, O. T.; ROSSI-NETO, J. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 70, p. 305-312, 2013.
- GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W. Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 689-695, 2005.
- GLÓRIA, N. A. Utilização da vinhaça. **Brasil Açucareiro**, v. 86, p. 11-17, 1980.
- GOMES, J. F. F. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2003. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F. S.; PICCOLO, M. C.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops - based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v. 106, p. 36-44, 2009.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S. **Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: efeitos do tráfego e de sistemas de manejo**. 2018. 127 f. Tese (Doutorado) - Instituto Agrônômico, Campinas.
- HAMER, U.; POTTHAST, K.; MAKESCHIN, F. Urea fertilization affected soil organic matter dynamics and microbial community structure in pasture soils of Southern Ecuador. **Applied Soil Ecology**, v. 43, p. 226-233, 2009.
- IPCC - International Panel on Climate Change. 2019 **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. 4): Agriculture, Forestry and Other Land**. Acesso em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>
- KINPARA, D. I. Aspectos econômicos de fertilizantes organominerais obtidos a partir de cama de frango e de torta de filtro de cana-de-açúcar no Brasil. Brasília: Embrapa Cerrados, 2020. (Embrapa Cerrados. Documentos, 360. (<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1130402/1/Doc-360-Daniel-Kinpara-web.pdf>).

- KORNDORFER, G. H.; ANDERSON, D. L. Use and impact of sugar-alcohol residues vinasse and filter cake on sugarcane production in Brazil. *Sugar y Azucar, Englewood Cliffs*, v. 92, p. 26-35, 1997.
- LA SCALA, 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, p. 244-248, 2006.
- 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, p. 775-785, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842012000400012>.
- LAZAROVITS, G.; NOWAK, J. Rhizobacteria for improvement of plant growth and establishment. *HortScience*, v. 32, p. 188-192, 1997.
- LEAL, M. R. L.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; SEABRA, J. E. A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C. O. F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy*, v. 53, p. 11-19, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.007>.
- LIMA, C. C. **Canteirização com preparo convencional e profundo do solo para cana-de-açúcar: atributos físicos e sistema radicular**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Agronômico, Campinas.
- LISBOA, I. P.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.; CERRI, C. C.; SATIRO, L. S.; WIENHOLD, B. J.; SCHMER, M. R.; JIN, V. L.; CERRI, C. E. P. Sugarcane straw removal effects on plant growth and stalk yield. *Industrial Crops and Products*, v. 111, p. 794-806, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.049>.
- LOURENÇO, K. S.; CASSMAN, N. A.; PIJL, A. S.; VAN VEEN, J. A.; CANTARELLA, H.; KURAMAE, E. E. *Nitrosospira* sp. govern nitrous oxide emissions in a tropical soil amended with residues of bioenergy crop. *Frontiers in Microbiology*, v. 9, 674, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00674>.
- LOURENÇO, K. S.; DIMITROV, M. R.; PIJL, A.; SOARES, J. R.; CARMO, J. B.; VAN VEEN, J. A.; CANTARELLA, H.; KURAMAE, E. E. Dominance of bacterial ammonium oxidizers and fungal denitrifiers in the complex nitrogen cycle pathways related to nitrous oxide emission. *Global Change Biology Bioenergy*, v. 10, p. 645-660, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12519>.
- LOURENÇO, K. S.; ROSSETTO, R.; VITTI, A. C.; MONTEZANO, Z. F.; SOARES, J. R.; SOUSA, R. D. M.; CARMO, J. B.; KURAMAE, E. E.; CANTARELLA, H. Strategies to mitigate the nitrous oxide emissions from nitrogen fertilizer applied with organic fertilizers in sugarcane. *Science of the Total Environment*, v. 650, p. 1476-1486, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.037> 0048-9697.
- LUZ, P. H. C.; VITTI, A. C.; Manejo e uso de fertilizantes para a cana-de-açúcar. In: MARQUES, M. O. (ed.) **Tecnologia na agricultura canavieira**. Jaboticabal, FCAV. 2008. P. 140-167.
- MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. I Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 1553-1567, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500020>.
- 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, p. 164-173, 2014.
- MARIN, F. R.; EDREIRA, J. I. R.; ANDRADE, J.; GRASSINI, P. On-farm sugarcane yield and yield components as influenced by number of harvests. *Field Crop Research*, v. 240, p. 134-142, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.011>.
- MELLIS, E. V.; QUAGGIO, J. A.; BECARI, G. R.; TEIXEIRA, L. A. J.; CANTARELLA, H.; DIAS, F. L. F. Soil fertility and crop nutrition effect of micronutrients soil supplementation on sugarcane in different production environments: cane plant cycle. *Agronomy Journal*, v. 108, p. 2060-2070, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0563>.
- MELO, P. L. A.; CHERUBIN, M. R.; GOMES, T. C. A.; LISBOA, I. P.; SATIRO, L. S.; CERRI, C. E. P.; SIQUEIRA-NETO, M. Straw removal effects on sugarcane root system and stalk yield. *Agronomy Journal*, v. 10, 1048, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9594-510.3390/agronomy10071048>.
- MENANDRO, L. M. S.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J.; KÖLL, O. T.; PIMENTA M. T. B. et al. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 11, p. 488-504, 2017. <https://doi.org/10.1002/bbb.1760>
- MEUNCHANG, S.; PANICHSAKPATANA, S.; WEAVER, R. W. Co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill. *Bioresource Technology*, v. 96, p. 437-442, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.024>.
- MIYASAKA, S.; CAMARGO, O. A.; CAVALERI, P. A.; GODOY, I. J.; WERNER, J. C.; CURTI, S. M.; LOMBARDI NETO, F.; MEDINA, J. C.; CERVELLINI, G. S.; BULISANI, E. A. **Adução orgânica verde e rotação de culturas no Estado de São Paulo**. Fundação Cargill. Campinas, 1984. 109 p.

- NUNES, M. R.; VELLOSO, A. C. X.; LEAL, J. R. Efeito da vinhaça nos cátions trocáveis e outros elementos químicos do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 16, p. 171-176, 1981.
- 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, p. 69-86, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031>.
- OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES-NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 1343-1352, 2010.
- PAREDES, D. D. S.; ALVES, B. J. R.; SANTOS M. A.; BOLONHEZI, D.; SANT'ANNA, S. A. C.; URQUIAGA, S.; LIMA, M. A.; BODDEY, R. M. Nitrous oxide and methane fluxes following ammonium sulfate and vinasse application on sugar cane soil. *Environmental Science & Technology*, v. 49, p. 11209-11217, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01504>.
- PAREDES, D. S.; LESSA, A. C. R.; SANT'ANNA, S. A. C.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R. Nitrous oxide emission and ammonia volatilization induced by vinasse and N fertilizer application in a sugarcane crop at Rio de Janeiro, Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* v. 98, p. 41-55, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9594-5>.
- PAULINO, J.; ZOLIN, C. A.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II. Características da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 244-249, 2011.
- PENATTI, C. P. *Adução da Cana-de-Açúcar: 30 anos de experiência*. Itui: Ottoni, 2013. 347 p.
- 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, p. 35-40, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000100005>.
- POSSIGNOLO-VITTI, N. V.; BERTONCINI, E. I.; VITTI, A. C. Decomposition of the organic matter of natural and concentrated vinasse in sandy and clayey soils. *Water Science and Technology*, v. 76, p. 728-738, 2017.
- PRELLWITZ, W. P. V.; COELHO, F. C. Produtividade de colmos, índice de área foliar e acúmulo de N na soca de cana-de-açúcar em cultivo intercalar com *Crotalaria juncea* L. *Revista Ceres*, v. 58, p. 776-780, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000600014>.
- RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2. ed. Campinas, Instituto Agronômico & Fundação IAC (*Boletim Técnico 100*), 1997. p. 56-57.
- 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, p. 1492-1500, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900048>.
- ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. *Australian Journal of Soil Research*, v. 45, p. 1-11, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR06079>. » <https://doi.org/10.1071/SR06079>.
- RODELLA, A. A.; SILVA, L. C. F. D. A.; FILHO, J. O. Effect of filter cake application on sugarcane yields. *Turrialba*, v. 40, p. 323-326, 1990.
- ROSSETTO, R.; CRUSCIOL, C. A. C.; CANTARELLA, H.; CARMO, J. B.; NASCIMENTO, C. A. C. Residues Uses and Environment Sustainability. In: SINGH, P.; TIWARI, A. K. *Sustainable Sugarcane Production*. Apple Academic Press. pp. 161-187, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351047760>.
- ROSSETTO, R.; SILVA, A.; VITTI, A. C.; PIEMONTE, M.; DIAS, F. L. F.; CANTARELLA, H. Concentrated vinasse applied in sugarcane ratoon: yield and soil fertility. In: ISSCT CONGRESS, 25, 2016. *Resumo...* Chiang Mai, Thailandia. <https://issct.org/wp-content/uploads/proceedings/2016/Agronomy-posters/12-RaffaellaRossetto.pdf>
- 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.; BRANCALÃO, S. R.; GARCIA, J. C. Cana-de-açúcar: cultivo com sustentabilidade. *Informações Agronômicas*, v. 142, p. 1-13, 2013.
- ROSSETTO, R.; VITTI, A. C.; DIAS, F. L. F.; CANTARELLA, H. Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. *Informações Agronômicas*, v. 124, p. 8-13, 2008.
- ROSSI NETO, J.; SOUZA, Z. M.; KÖLLN, O. T.; CARVALHO, J. L. N.; FERREIRA, D. A.; CASTIONI, G. A. F.; BARBOSA, L. C.; CASTRO, S. G. Q.; BRAUNBECK, O. A.; GARSIDE, A. L.; FRANCO, H. C. J. The arrangement and spacing of sugarcane planting influence root distribution and crop yield. *BioEnergy Research*. v. 11, p. 291-304, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9896-1>.
- SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELLOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (ed.). *Cana-de-açúcar*. 1ed. Campinas/SP: Instituto Agronômico. v. 1, p. 47-56, 2008.

- SCHULTZ, N. **Efeito Residual da adubação em cana planta e adubação nitrogenada em cana de primeira soca com aplicação de vinhaça**. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- SCHULTZ, N.; MORAIS, R. F.; SILVA, J. A.; BAPTISTA, R. B.; OLIVEIRA, R. P.; LEITE, J. M.; PEREIRA, W.; CARNEIRO JÚNIOR, J. B.; ALVES, B. J. R.; BALDANI, J. I.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; REIS, V. M. Avaliação agrônômica de variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, p. 261268, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100204X2012000200015>.
- SCHWARTZ, R. C.; BAUMHARDT, R. L.; EVETT, S. R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. *Soil & Tillage Research*, v. 110, p. 221-229, 2010.
- SEGNINI, A.; CARVALHO, J. L. N.; BOLONHEZI, D.; MILORI, D. M. B. P.; SILVA, W. T. L.; SIMÕES, M. L.; CANTARELLA, H.; MARIA, I. C.; MARTIN-NETO, L. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. *Scientia Agricola*, v. 70, p. 321-326, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500006>.
- SILVA, A. P. M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, p. 38-43, 2014.
- SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, p.1 08-114, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000100014>.
- SILVA, A.; ROSSETTO, R.; BONNECINE, J.; PIEMONTE, M.; MURAOKA, T. Net and potential nitrogen mineralization in soil with sugarcane vinasse. *Sugar Tech*, v. 21, p. 505-513, 2013.
- SILVEIRA, M.A.G.; VITUSSO, L.; MEDINA, N.H. Distribuição de potássio em cana-de-açúcar. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 3, p. 1-8, 2015.
- SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C saturation of soils. *Plant and Soil*, v. 241, p. 155-176, 2002.
- SOUSA JÚNIOR, J. G. A.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, B. G.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Three-year soil carbon and nitrogen responses to sugarcane straw management. *BioEnergy Research*, v. 11, p. 249-261, 2018.
- SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; BARBOSA, R. S.; ARAÚJO, F. S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v. 38, p. 135-146, 2014.
- SOUZA, Z. M.; PARDO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada da cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, p. 271-278, 2005.
- 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, p. 61-68, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.2051>.
- TEIXEIRA, W. G.; SOUZA, R. T. X. de; KORNDÖRFER, G. H. Response of sugarcane to doses of phosphorus provided by organomineral fertilizer. *Bioscience Journal*, v. 30, p. 1729-1736, 2014.
- TENELLI, S.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; CARVALHO, J. L. N. Multilocation changes in soil carbon stocks from sugarcane straw removal for bioenergy production in Brazil. *GCB Bioenergy*, v. 13, p. 1099-1111, 2021.
- TENELLI, S.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; CARVALHO, J. L. N. Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed? *BioEnergy Research*, v. 12, p. 764-777, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09996-3>.
- TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R. et al. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Scientia Agricola*, v. 70, p. 345-352, 2013.
- ÚNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Bioeletricidade. 2022. Disponível em: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/> Acesso em: 10 jan. 2022.
- URQUIAGA, S.; ZAPATA, F. **Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales em America Latina Y el Caribe**. Porto Alegre: Gênese, 2000. 110 p.
- VASCONCELOS, R. L.; SILVA, G. P.; CAMPOS, C. N. S.; CAIONE, G.; MODA, L. R.; PRADO, R. M. Características químicas de solo sob fontes e doses de fósforo e torta de filtro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34, 2013, Florianópolis. **Resumos**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 1-4.