

Gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos na cana-de-açúcar

Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel | Fernando José Freire | Fábio Cesar da Silva | Cassio Hamilton Abreu Junior | Luis Fernando Sanglade Marchiori | Arnaldo José Raizer

Introdução

O setor sucroalcooleiro brasileiro gera anualmente expressivas produções de cana, açúcar e etanol. Ocupa extensivas áreas de terras agrícolas, nas quais se instalam grandes canaviais e enormes conglomerados industriais, com suas infraestruturas físicas, máquinas e equipamentos, além da participação de milhões de pessoas em suas atividades e operações.

O crescimento de toda a cadeia de produção da cana impulsiona investimentos em estudos e envolve a utilização racional dos subprodutos gerados no campo de produção ou na industrialização da cana. O bagaço gerado a partir da moagem da cana pode ser utilizado na produção de bioeletricidade (uma fonte de energia limpa), como adubo orgânico incorporado ao solo e na queima em caldeiras para geração de vapor visando a diversas finalidades, diminuindo até mesmo o consumo de madeira, nativa ou não. O bagaço de cana pode ainda ser usado na alimentação de animais ruminantes, haja vista o grande rebanho de bovinos produzido em sistema de confinamento no Brasil.

A grande quantidade de palhiço deixado no campo, mesmo que não seja aproveitado, alimenta a importante ciclagem de nutrientes que tanto beneficia a cultura da cana. Esse palhiço também pode ser aproveitado para alimentar as fornalhas para a geração de vapor e energia (Braunbeck; Cortez, 2005), bem como na produção da bioeletricidade e do bioetanol de

segunda geração, por hidrólise enzimática. Tais resíduos sólidos e efluentes, sejam eles intrínsecos à usina (como a torta de filtro, por exemplo) ou de fontes externas (como lodo de esgoto e composto de lixo), seguem as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004). O esquema de produção dos resíduos da agroindústria canavieira que decorrem do processo industrial de produção de açúcar e álcool encontra-se ilustrado na Figura 10.1.



Figura 10.1. Produção de resíduos decorrente da produção de açúcar e álcool por usina de açúcar com destilaria anexa.

Inovação no gerenciamento de resíduos na indústria da cana – 6 Bios e as gerações tecnológicas

Usina sustentável

A definição mais aceita para desenvolvimento sustentável surgiu em 1987 como forma de dar

continuidade a um projeto da Organização das Nações Unidas (ONU), isto é, desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazerem suas próprias necessidades (WWF, 2023). É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.

Mais amplo que a simples racionalização da utilização dos recursos naturais, o conceito de desenvolvimento sustentável envolve não apenas questões ambientais ou ecológicas, mas também questões econômicas e sociais. Adota-se, então, a visão do *triple bottom line* (Rossi; Rios, 2014), na qual as organizações passam a se preocupar não somente com suas atividades produtivas e com a utilização racional dos recursos naturais, mas também com sua atuação na sociedade (Figura 10.2).

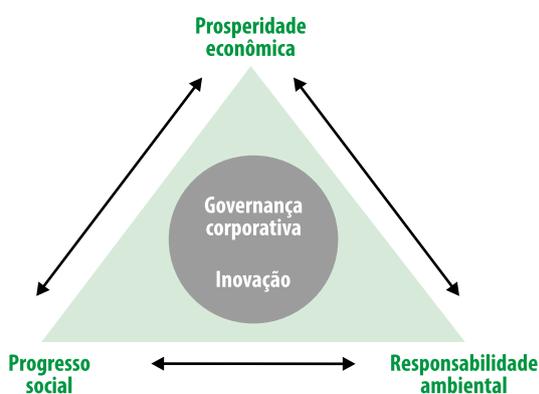


Figura 10.2. Os três pilares da sustentabilidade (*triple bottom line*).

Fonte: Rossi e Rios (2014).

Dessa forma, estão dentro desse conceito os processos tecnológicos conhecidos como 6 Bios (Bioetanol, Bioaçúcar, Bioeletricidade, Biodiesel, Biofom e Bioágua), os quais foram desenvolvidos pela Dedini, que, mais uma vez, apresenta um produto mundialmente pioneiro, que é a Usina Sustentável Dedini (USD) (o balanço dos gases do efeito estufa da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar está apresentado no Apêndice A). A USD atende e amplia os requi-

sitos de sustentabilidade (Gurgel, 2009b). Esse conceito de Usina de Biodiesel integrada à Usina Sucroalcooleira, como é o caso da Usina Barral-cool, a primeira 4 Bios no mundo, que integra a produção de Bioaçúcar, Bioetanol, Bioeletricidade e Biodiesel em uma única planta (Olivério et al., 2010b, 2010c).

Bioetanol

O uso do bioetanol é uma das poucas soluções estratégicas disponíveis para resolver dois importantes problemas atuais: a substituição do petróleo e a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE). A produção de biocombustíveis e de energia limpa é uma oportunidade para o Brasil, que tem a chance de se firmar também como o principal exportador dessa commodity e, principalmente, de tecnologia, equipamentos e serviços para países que venham a produzir esse biocombustível localmente.

Melhorar a eficiência da transformação da cana-de-açúcar em bioetanol é um dos grandes desafios para manter a competitividade brasileira no mercado internacional. Em uma análise crítica do modelo de produção brasileiro, fica evidenciado que o principal desafio (ou *gap*) tecnológico ocorre no processo fermentativo, devido a sua baixa eficiência. Atualmente novos sistemas de fermentação estão sendo desenvolvidos, os quais modificam os conceitos atuais. Entre eles, há o sistema de fermentação que utiliza o conceito dos biorreatores com novo design de construção para a recuperação do etanol perdido por evaporação. Esse sistema, que é totalmente automatizado, resulta em maior assepsia ao substituir os trocadores de placas pelo sistema *chiller* para o resfriamento do mosto. Além disso, trabalha com o mosto e o pé de cuba concentrados, a fim de gerar um vinho de teor alcoólico maior, ocasionando o aumento de produtividade e rendimento do processo

(Cortez et al., 2016). Esse sistema pode ser projetado para operação contínua, em batelada alimentada ou flexível, que permite a operação em ambos os casos.

No processo de recuperação do etanol produzido, a principal inovação é a destilação contínua, que visa otimizar tanto a eficiência energética quanto operacional. Essa nova tecnologia decorre de novo conceito de destilarias totalmente adequadas aos principais padrões de segurança e com menor consumo de energia e demanda por água (Olivério et al., 2010b).

Além da otimização energética pela melhoria da eficiência operacional, nos últimos anos a principal força motivadora para atender à necessidade de maximizar a eficiência energética das plantas novas e existentes tem sido a cogeração de energia elétrica ou produção de bioeletricidade. Dentro dessa realidade, foi desenvolvido um sistema de destilação para a obtenção do etanol hidratado, chamado de *split feed*¹, sendo possível aumentar a produção na destilaria em aproximadamente 60%, por meio do aproveitamento do mesmo vapor existente na planta (Cortez et al., 2016).

Na obtenção de álcool anidro, foram introduzidas novas tecnologias de desidratação, desde a substituição dos antigos sistemas de desidratação com o uso de ciclo-hexano (ou ciclohexano) pelo sistema de peneiras moleculares, que elimina a necessidade de qualquer agente químico desidratante, o que reduz consideravelmente o consumo de vapor e água. A evolução do sistema se deu pelo desenvolvimento da peneira molecular (em inglês: *low steam consumption* – LSC), que, pelo uso da recompressão de vapor e automatização (Cortez et al., 2016), maximizou a eficiência energética do sistema, integrando-se totalmente ao conceito de usina sustentável.

¹ Sistema de destilação totalmente automatizado pela Siemens/Chemtech, com integração térmica e uso de vácuo.

Bioeletricidade

A cana-de-açúcar gera dois produtos principais: o bioaçúcar e o bioetanol. Para a geração desses produtos, o consumo necessário de energia para o acionamento dos equipamentos e processos sempre foi suprido pela autogeração de energia, produzida a partir do consumo do bagaço da cana, para queima em caldeiras e geração de vapor (Olivério et al., 2010a, 2010b).

Para a cogeração de energia, há necessidade de adequação e investimentos em equipamentos que suportem altas pressões e temperaturas de operação das caldeiras de leito fluidizado, possibilitando a geração de vapor com elevada eficiência energética. Nesse sentido, o fornecimento e a distribuição de energia tornaram-se estratégicos para o planejamento e a expansão de qualquer unidade produtiva, justificando a preocupação tanto com o aumento da oferta de energia e a otimização do seu uso, quanto com a substituição de fontes de energias poluidoras e não renováveis por fontes não poluidoras e provenientes de fontes renováveis, como a biomassa, por exemplo. Atualmente, o fornecimento de bioeletricidade pela rede de usinas e destilarias já é um novo negócio, que possibilita aumento de receita e lucros, utilizando-se a mesma matéria-prima: a cana-de-açúcar.

Biodiesel

As usinas de biodiesel devem operar em Processo de Produção Contínua por Rota Etilica ou Metilica, pois viabilizam o processo, a partir do óleo de soja e do sebo bovino (como ocorre na Usina Barrálcool), principalmente com metano, apresentando menor custo, gera menos coprodutos e efluentes e consumo menos energia e utilidades.

A unidade de produção de biodiesel na Usina Barrálcool foi implantada pela empresa Dardini (2009) e conta com tecnologia de ponta,

desenvolvida pela empresa italiana Balestra. A planta de biodiesel tem uma série de características inovadoras e de conceito completo, incluindo o tratamento das matérias-primas (Cortez et al., 2016). A planta estabelecida pela empresa Dedini (2009), que foi instalada em Barra dos Bugres, MT, como citado por Cortez et al. (2016), pode utilizar qualquer tipo de óleos vegetais e gorduras animais, aproveitando da melhor forma os subprodutos, como é o caso do tratamento da glicerina. A fabricação de biodiesel pode ser efetuada com o processo de transesterificação e esterificação. A unidade de biodiesel segue padrões internacionais de segurança e tem capacidade de produção de 194 m³ de biodiesel por dia.

Biofom

A preocupação com os recursos naturais não renováveis, como os combustíveis fósseis, principalmente o petróleo, tem obrigado muitas empresas a buscar alternativas para substituí-los em seus processos produtivos. Com base nesse cenário, foi desenvolvido o Biofom (biofertilizante organomineral), patenteado pela Dedini (2018). Trata-se de um fertilizante produzido com os resíduos da agroindústria sucroalcooleira (vinhaça concentrada, torta de filtro, cinzas de caldeira e fuligem das chaminés), que se apresenta como uma solução para substituir a adubação mineral da cana-de-açúcar e de outras culturas, adequando os teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). O produto proveniente dessa mistura, após a complementação e o tempo de maturação necessários, é transformado em adubo organomineral, que contém os elementos requeridos para a necessidade da cultura da cana, além de melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo, devido ao teor de matéria orgânica do produto (Gurgel, 2012). O manejo agrônomico e o detalhamento da produção do Biofom serão tratados mais adiante.

Bioágua

Foi dado um importante passo em busca da sustentabilidade econômica, social e ambiental das usinas de bioaçúcar e bioetanol, para as quais foram desenvolvidas plantas autossuficientes na geração de água e usinas produtoras de água.

Esses conceitos são inovadores e inéditos no mercado mundial: as usinas autossuficientes em água não demandam abastecimento externo de mananciais, pois a água presente na cana é suficiente para atender às necessidades dos processos internos da usina.

A evolução desse conceito é a otimização dessa tecnologia, fazendo com que a usina de bioaçúcar e bioetanol recupere uma quantidade maior de água proveniente da cana-de-açúcar em comparação à que será utilizada nos processos internos, tornando possível exportar esse excedente para uso industrial.

As usinas que adotarem tais projetos não precisarão captar água dos mananciais ou de poços para o processo produtivo. A água que elas utilizarão está contida na própria cana. Em 1 t de cana, é possível obter 700 L de água. Existem perspectivas de projetos em que a unidade industrial, além de ter a mesma característica da anterior, poderá disponibilizar água extra para outros usos, como na irrigação, ou para outras empresas, e assim se tornar uma exportadora.

De acordo com dados do Centro de Tecnologia Canavieira (Oliveira, 2008), na média do consumo do estado de São Paulo, as usinas consomem 1.830 kg (equivalente a 1.830 L de água) por tonelada de cana. Além desse volume, entram na produção mais os 700 L de água por tonelada de cana, totalizando 2.530 L de água. Com a mudança de processos ao longo do sistema produtivo do etanol ou do açúcar, como, por exemplo, a concentração da vinhaça de 3 até 60% de matéria seca, aproximadamente, foi possível não só evitar o uso de água de ma-

nanciais, mas também recuperar grande parte do líquido usado no processo. No caso da usina exportadora, aproveitam-se 400 L de água da cana e 300 L são disponibilizados como excedente (Cortez et al., 2016).

Uso agrícola de resíduos e efluentes da agroindústria sucroenergética

Geração de resíduos e efluentes na agroindústria sucroenergética

Resíduos como águas de lavagem, cinzas, torta de filtro, fuligem de caldeira e vinhaça necessitam de um rigoroso controle ambiental, que, no estado de São Paulo, é feito pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), a fim de cumprir a legislação vigente e sua caracterização. Quanto ao bagaço de cana, quando é aproveitado diretamente como combustível na indústria, sem disposição no ambiente, o controle ambiental é exercido sem maiores dificuldades. As quantidades produzidas desses resíduos dependem do(s) tipo(s) de produto(s) final(is) que a indústria foi projetada para operar — de acordo com o fluxograma de produtos, subprodutos e resíduos da agroindústria tradicional da cana-de-açúcar ilustrado na Figura 10.3. Usinas que produzem apenas açúcar, nas quais não há resíduo de vinhaça, e destilarias autônomas não produzem torta de filtro. A produção de águas de lavagem, bagaço e cinzas é comum a todas. Todavia ainda há diferenças em relação à quantidade produzida devido ao tipo de equipamento em operação. Por exemplo, a caldeira do tipo grelha produz muito mais cinzas do que a de leite fluidizado, pelo fato de a primeira ter uma combustão mais incompleta do que a segunda.

Outro aspecto relevante é que, com o incremento de tecnologia no processo industrial dos

últimos anos, houve aumento na produção média de açúcar e de etanol por tonelada de cana moída. Segundo Orlando Filho et al. (1983), houve rendimentos médios de 94 kg de açúcar Very High Polarization (VHP), 12 L de etanol hidratado para cada tonelada de cana processada, em usina de açúcar com destilaria anexa, e 70 L de etanol para cada tonelada de cana em destilarias autônomas. No entanto, Bertoncini (2007) atualizou esses rendimentos para 110 kg de açúcar VHP, 13 L de etanol hidratado no caso das usinas de açúcar com destilaria anexa e 80 L de etanol hidratado para destilarias autônomas. Com isso, aumentaram também as quantidades de resíduos, principalmente vinhaça.

Em geral, entre 10 e 18 L de vinhaça são gerados para cada litro de etanol hidratado produzido nas destilarias (Stupiello, 1987; Buzolin, 1997). Entretanto, frequentemente esses valores variam de 12 a 15 L de vinhaça por litro de etanol hidratado, dependendo dos equipamentos e processos de industrialização. Há uma tendência de que, com avanços tecnológicos, esses resíduos não ultrapassem 10 a 12 L por litro de etanol hidratado produzido.

Caracterização e utilização de resíduos agroindustriais

Águas de lavagem

A agroindústria da cana-de-açúcar consome em média 1.830 L de água por tonelada de cana, de acordo com dados do Centro de Tecnologia Canavieira (Waldheim et al., 2001; Oliveira, 2008). Essa água apresenta um pH de aproximadamente 4,8 e uma demanda biológica de oxigênio (DBO) que varia de 200 a 1.200 mg L⁻¹ (Piacente, 2005). Essa água pode ser recirculada, utilizada na fertirrigação, incorporada à vinhaça, tratada ou descartada.

A meta do setor sucroalcooleiro é de consumir quantidades inferiores a 1 m³ de água por

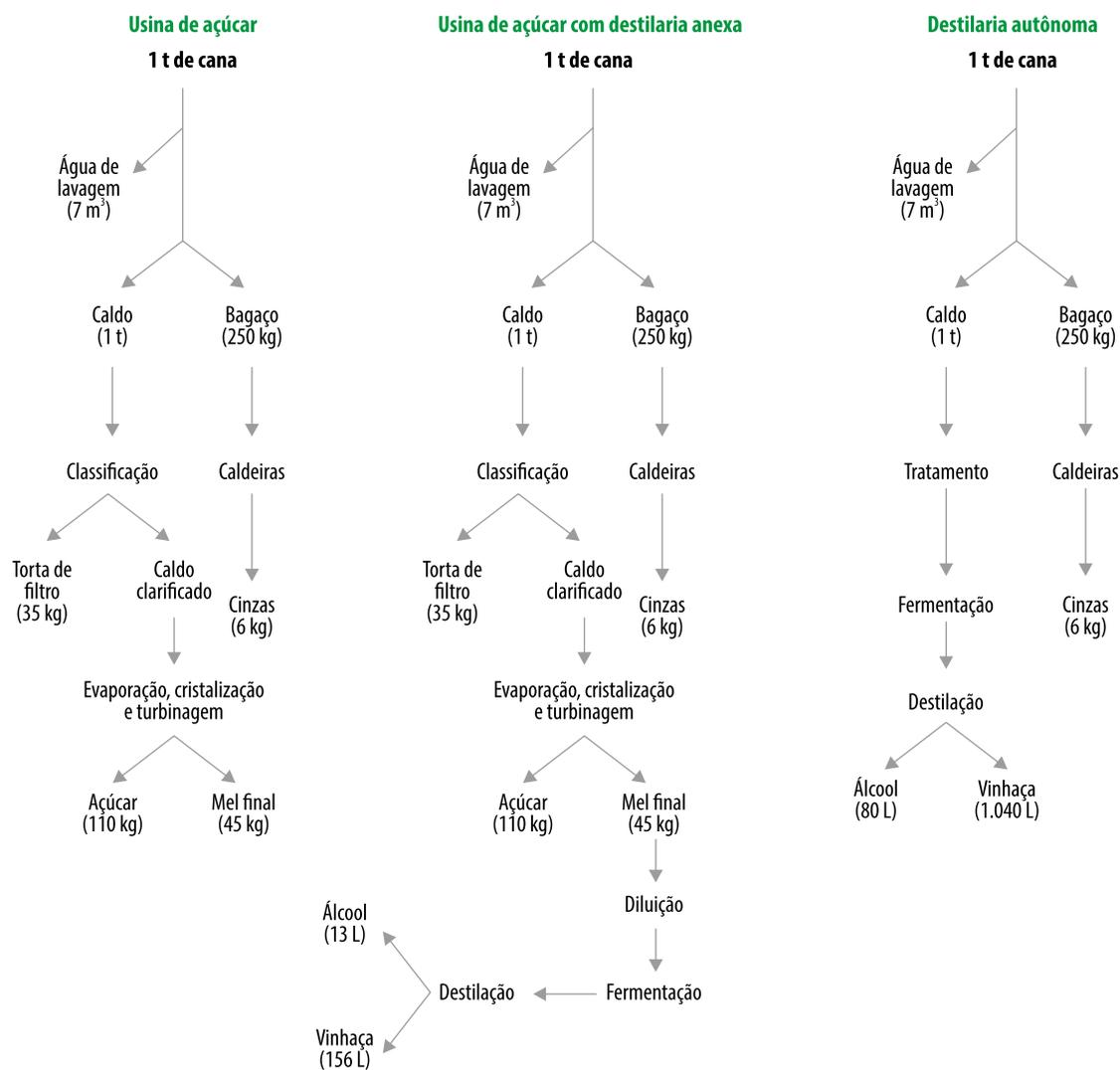


Figura 10.3. Fluxograma de produtos, subprodutos e resíduos da agroindústria tradicional da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Orlando Filho et al. (1983), Bertoini (2007) e Centro de Tecnologia Canavieira (2019).

tonelada de colmo. A prática da colheita de cana feita mecanicamente proporcionou reduções significativas no processo industrial. Além disso, o reúso dessas águas é uma alternativa de fundamental importância, principalmente quando há plenamente estabelecido o plano de gestão de recursos hídricos, em que a cobrança pelo uso da água se diferenciará entre usuário pagador e poluidor pagador.

Na maioria dos países produtores de açúcar, existem normas de controle de efluentes líquidos que estabelecem um limite da quantidade de orgânicos, que varia entre 15 e 60 mg L⁻¹ de DBO (Purchase, 1995). O Banco Mundial faz exi-

gências quanto ao máximo de concentração de poluentes nos efluentes, como pode ser observado na Tabela 10.1.

Muitas são as alternativas que permitem alcançar um balanço hídrico equilibrado, promovendo reduções consideráveis no uso da água, como técnicas de reúso, retorno de condensáveis, implementação de limpeza a seco da cana, macromedição do consumo e desassoreamento das represas de captação. Isso certamente fará com que as usinas operem sem alterar a quantidade e a qualidade dos corpos de água adjacentes às atividades industriais.

Tabela 10.1. Indicadores e respectivos valores máximos exigidos pelo Banco Mundial para efluentes líquidos das usinas do setor sucroalcooleiro.

Indicador	Valor máximo
pH	6,5–8,5
DBO ⁽¹⁾	30 mg L ⁻¹
DQO ⁽²⁾	250 mg L ⁻¹
Sólidos totais em suspensão	50 mg L ⁻¹
Óleos e gorduras	10 mg L ⁻¹
Nitrogênio total	10 mg L ⁻¹
Fósforo total	2 mg L ⁻¹

⁽¹⁾ Demanda bioquímica de oxigênio; ⁽²⁾ Demanda química de oxigênio.

Fonte: Rossetto (1987) e Purchase (1995).

Cinzas e fuligem

A produção de cinzas ocorre durante a queima do bagaço nas caldeiras para a geração de energia. Considerando-se que toda a cinza presente no bagaço se transforme em resíduo na caldeira, admite-se uma produção de 5 a 6 kg de cinzas por tonelada de cana moída (Figura 10.3). Isso equivale a aproximadamente 2,5% de cinzas no bagaço queimado ou 0,6% de cada tonelada de cana moída na indústria. Essa queima também produz materiais particulados que estão associados às cinzas e à fuligem.

Tanto as cinzas quanto a fuligem carregam consideráveis teores de nutrientes (Tabela 10.2), o

que as credencia para uso no setor de produção agrícola da empresa. As cinzas podem ser distribuídas em área total ou aplicadas localizada-mente no sulco de plantio. Outro uso comum é como incremento no processo de compostagem, melhorando a qualidade nutricional dos compostos.

Cordeiro et al. (2009) concluíram que as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar são uma matéria-prima com potencial para a produção de concreto, possuindo propriedades aglomerantes de material cimentício, apresentando como principal composto químico a sílica, normalmente em quantidade acima de 60% (m/m). Como são resíduos oriundos de subprodutos da própria cana-de-açúcar (queima do bagaço), que é uma grande extratora de sílica, a aplicação de cinzas e fuligem nos solos faz retornar parte considerável das quantidades extraídas na etapa de cultivo.

A fuligem como material particulado em suspensão pode ser adicionada à vinhaça e aplicada em fertirrigação. Quando sólida, pode ser misturada às cinzas e/ou ser mais um componente na formação de compostagem.

É recomendável monitorar as quantidades de metais pesados adicionados ao solo devido à aplicação de cinzas e fuligem, visando evitar possíveis contaminações, principalmente em aplicações prolongadas, nas quais os efeitos

Tabela 10.2. Composição química média das cinzas de caldeira e da fuligem produzidas pela queima do bagaço para produção de energia em agroindústria de cana-de-açúcar.

Material	Composição química (dag kg ⁻¹)					
	Al ₂ O ₃ + F ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Cinzas ⁽¹⁾	8,0	85,0	0,9	1,7	1,0	0,6
Fuligem ⁽²⁾	–	38–72	0,5–1,0	0,7–3,0	0,6–1,5	0,4–0,8

⁽¹⁾ Há presença de outros óxidos e metais pesados. ⁽²⁾ Em média, a fuligem apresenta 70% de água, outros óxidos e metais pesados.

Fonte: Adaptado de Pan et al. (1979), Planalsucar (1980) e Bertoncini (2007).

residuais podem elevar os teores desses contaminantes (Abreu Junior et al., 2005).

Os efeitos das cinzas e/ou fuligem aplicados isoladamente no solo, principalmente pelos seus teores de P e K, além de relativo efeito corretivo pelos teores de CaO e MgO, não são frequentes em canaviais no Brasil. Pineda (1956) e Pan et al. (1979) relatam efeitos desses resíduos no crescimento de cana-de-açúcar quando utilizados como fertilizantes.

Camargo et al. (1984) trabalharam com cinza de caldeira como tratamento para verificar possíveis alterações de características químicas em um Latossolo Roxo distrófico no estado de São Paulo. O estudo mostrou elevação no pH dos solos durante e após a incubação das amostras. Apesar do aumento de P disponível, os teores de K adicionados no resíduo não se apresentaram solúveis.

Esses resíduos são normalmente aplicados ao solo em associação com outros resíduos, principalmente a vinhaça (fuligem líquida), ou são utilizados como constituintes para formação de compostagem.

Bagaço

A caracterização do bagaço de cana-de-açúcar como resíduo parece ser inapropriada pelo valor energético desse subproduto da agroindústria, além de ser matéria-prima para outras indústrias, como, por exemplo, a de celulose de papel. Se a caracterização como resíduo fica comprometida, o uso do bagaço na agricultura canavieira como fertilizante ou condicionante de solo é de contestável implicação econômica.

Normalmente, todo bagaço produzido na agroindústria é utilizado como fonte de energia nas usinas de açúcar, com ou sem destilarias anexas. Estima-se que cerca de 25 a 30% do bagaço seja excedente, no caso de destilarias autônomas. Nesse caso, há uma possibilidade de

uso desse excedente na atividade agrícola da empresa, quando nenhum outro beneficiamento estiver disponível.

Em comparação com outros resíduos da agroindústria, o bagaço é considerado um subproduto nobre utilizado historicamente na geração de calor para os processos de industrialização do açúcar e do etanol. Com o desenvolvimento e o aperfeiçoamento do emprego do vapor, o uso do bagaço intensificou-se com o conceito de cogeração de energia, entendida como sendo a geração de calor na fornada interna da caldeira de geração de vapor do tipo flamotubular e transformada em trabalho no turbogerador, e foi desenvolvido paralelamente às inovações tecnológicas.

Cada tonelada de cana que é moída gera aproximadamente 250 kg de bagaço. Revertido em energia calórica, isso representa o equivalente a 560 mil quilocalorias. Essa mesma quantidade de cana produz 80 L de álcool, que proporcionam em torno de 448 mil quilocalorias de energia, ou seja, existe mais energia embutida no bagaço da cana do que no etanol isoladamente (Cortez et al., 1992).

A quantidade de bagaço retirada de 1 t de cana, aliada ao atual modelo tecnológico de equipamentos para cogeração empregado nas usinas brasileiras, proporciona o equivalente a 70 kWh de energia (Rodrigues, 2001). Desses, 20 kWh (28,6%) são utilizados para gerar vapor e movimentar os equipamentos que compõem toda a usina, enquanto cerca de 10 kWh (14,3%) são perdidos. Os 40 kWh (57,1%) restantes podem ser utilizados em programas de cogeração de energia.

Comparando a queima do bagaço com outros combustíveis fósseis, ela é mais limpa e gera menor impacto ambiental, uma vez que praticamente não libera compostos de enxofre (S), como SO₂ ou SO₃, que são relativamente comuns

na queima de óleos combustíveis. Além disso, sua queima é lenta, com uma temperatura de chama baixa, proporcionando pouca formação de óxido nítrico.

As crises energéticas que ocorrem no Brasil desde 2001, com as frequentes ameaças de “apagões” e a política de racionamento do governo, levaram pesquisadores, estudiosos e especialistas do setor energético a repensar a matriz energética nacional, com base quase que exclusivamente em hidrelétricas. Uma das saídas propostas é a construção de termoeletricas movidas a gás natural, cujo preço é fixado em dólar no mercado internacional. A outra baseia-se na utilização da capacidade instalada das usinas de cana para gerar excedentes energéticos a partir da queima de biomassa.

Dentro desse contexto de risco potencial de déficit no abastecimento de energia elétrica e de crise econômico-financeira do setor elétrico, algumas usinas começaram a viabilizar investimentos em equipamentos de cogeração mais modernos e eficientes, a fim de produzir excedentes de energia elétrica comercializáveis, como os chamados *greenfields*, que são usinas dedicadas somente à produção de bioeletricidade e bioetanol.

Em relação à bioeletricidade, a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (Observatório..., 2020) cita que a capacidade instalada e atualmente outorgada no País pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) é de 169.664 MW. Em geral, a biomassa como fonte de energia representa 9% da potência outorgada na matriz elétrica do Brasil e ocupa a quarta posição na matriz, atrás da fonte hídrica, das termelétricas a gás natural e das eólicas, respectivamente. Destaca-se ainda que, em 2018, 82% da bioeletricidade fornecida ao Sistema Interligado Nacional (SIN) vieram do setor sucroenergético. Por fim, ressalta-se que apenas 15% do potencial da bioeletricidade sucroenergética é apro-

veitado. O aproveitamento pleno da biomassa presente nos canaviais teria potencial técnico para chegar a 142 mil gigawatts, quase sete vezes o volume ofertado em 2018, o que representaria atender mais de 30% do consumo de energia de SO₂ ou SO₃. (Observatório..., 2020). Assim, a utilização de bagaço de cana-de-açúcar nas atividades agrícolas corresponde à última opção em uma grande cadeia de opções para esse subproduto.

A composição da matéria seca do bagaço apresenta baixos teores de N, o que praticamente inviabiliza sua utilização como fertilizante (Tabela 10.3). Como fonte de matéria orgânica, sua elevada relação C:N pode causar imobilização de N no solo por um período muito prolongado. Minhoni et al. (1990) estudaram a velocidade de decomposição de materiais orgânicos incorporados ao solo, com adição de N e fósforo natural, e concluíram que o bagaço de cana foi o material menos decomposto e que o fator mais limitante para essa decomposição foi o N. Assim, a alta relação C:N do bagaço e sua dependência do N presente no sistema inviabilizam sua utilização como fonte de matéria orgânica se não houver um pré-tratamento para humificação. Zambello Júnior e Orlando Filho (1982) não encontraram respostas para o incremento de produtividade da cana-de-açúcar com a aplicação de 2 t ha⁻¹ de bagaço não humificado, na base seca, no sulco de plantio.

A adição de bagaço à torta de filtro, cinzas, fuligem e outros resíduos para compostagem pode ser uma alternativa para a utilização de bagaço como fonte de matéria orgânica em cana-de-açúcar. Entretanto, os efeitos energéticos do bagaço, segundo Cortez et al. (2016), são altamente positivos e o tornam muito mais vantajoso como fonte de energia (Tabela 10.3).

Tabela 10.3. Composição química média da matéria seca de bagaço de cana-de-açúcar.

Material	Composição química (dag kg ⁻¹)					
	C	H	O ₂	N	Cinzas	C:N
Bagaço	43–49	5,3–6,7	42–49	0,2–0,4	1,3–3,5	122–215

Fonte: Adaptado de Sagarra (1966) e Cortez et al (2016).

Torta de filtro

A torta de filtro é o resultado da filtragem do lodo obtido no processo de fabricação de açúcar em filtros rotativos para extração da sacarose residual da borra, que é um subproduto resultante da clarificação do caldo da cana-de-açúcar pelo emprego de polieletrólitos (Figura 10.4). Como a torta resulta do lodo decantado, há concentração de alguns metais, principalmente alumínio (Al), manganês (Mn), zinco (Zn) e ferro (Fe). Por causa de sua característica orgânica, apresenta elevada DBO, o que pode causar sérios danos ambientais se transportada em direção aos corpos d'água.

Foto: Raffaella Rossetto



Figura 10.4. Produção de torta de filtro, em filtros rotativos, para extração da sacarose residual da borra no processo de clarificação do caldo.

Estudos realizados por Ramalho e Amaral Sobrinho (2001) em solos do tipo Cambissolo que receberam sucessivamente torta de filtro durante 20 anos apontam aumento significativo na concentração dos teores totais de metais pe-

sados, como cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu) e níquel (Ni), e um potencial risco de contaminação do lençol freático pela possível percolação desses metais mais móveis.

A produção de torta de filtro é de 2,5 a 3,5% da quantidade de cana moída (União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2007). As dez maiores usinas de São Paulo, se for considerado o processamento de 571,34 milhões de toneladas de cana-de-açúcar da safra 2010/2011, produziram aproximadamente 17,14 milhões de toneladas de torta de filtro (Observatório..., 2020).

A composição química da torta de filtro é variável de acordo com os dados da Tabela 10.4. Por exemplo, nas usinas que clarificam o caldo utilizando P, há tendência de que haja maior riqueza desse elemento no resíduo. Entretanto, de maneira geral, é um resíduo que apresenta baixos teores de K.

Glória et al. (1977) detalharam a composição mineral da torta de filtro quanto à presença de formas de N, P e carbono (C) oxidável. Os autores concluíram que o resíduo apresenta quantidades consideráveis de matéria orgânica. No entanto, mostraram que o N predomina na forma proteica e que 30% do P total encontra-se em compostos orgânicos. Com isso, a liberação desses nutrientes é lenta, embora a relação C:N não seja elevada (Tabela 10.4).

Um dos primeiros trabalhos realizados no Brasil sobre o aproveitamento da torta de filtro como fertilizante foi realizado por Brasil Sobrinho (1958), o qual evidenciou o efeito desse resíduo

Tabela 10.4. Composição química média da torta de filtro gerada na fabricação de açúcar na agroindústria da cana-de-açúcar.

Composição química	Torta de filtro
	(dag kg ⁻¹)
Umidade	73
N	0,38
P ₂ O ₅	0,88
K ₂ O	0,06
CaO	0,94
MgO	0,28
SO ₄ ²⁻	3,55
SiO ₂	14,06
C	8,37
C:N	23,8
	(mg kg ⁻¹)
Fe	25.100
Mn	624
Cu	65
Zn	89
Mo	0,6

Nota: De um modo geral, a quantidade de fósforo (P) na torta sempre foi maior na originaria da fabricação do açúcar até o dobro.

Fonte: Adaptado de Glória et al. (1973), Glória e Magro (1977), Planalsucar (1980), Rossetto et al. (1984) e Cortez et al. (2016).

como complemento da fertilização mineral. O estabelecimento da dose necessária é baseado no teor de P do resíduo e no requerimento da cultura. Por exemplo, considerando um teor de P na torta de filtro de 0,88 dag kg⁻¹ (Tabela 10.4), uma dose de 20 t ha⁻¹ aplicada no sulco de plantio irá fornecer 176 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Isso representa a quantidade recomendada de P₂O₅ para solos que apresentam teores muito baixos ou baixos de P.

Quanto às recomendações para aplicação de torta de filtro, Rosseto e Santiago (2006) estabelecem para cana-planta a dosagem de 8 a 10 t ha⁻¹ (torta úmida) em área total em pré-

-plantio, de 15 a 35 t ha⁻¹ quando a aplicação se dá no sulco e de 40 a 60 t ha⁻¹ na entrelinha das soqueiras, substituindo parcial ou totalmente a adubação fosfatada, dependendo da dose de P₂O₅ recomendada.

A Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (1998) afirma que, em Pernambuco, quando se aplicam quantidades iguais ou superiores a 5 t ha⁻¹ de torta de filtro no sulco de plantio, a fertilização com micronutrientes será suprimida em cana-planta.

Nardin (2007) estudou os efeitos da aplicação de torta de filtro nas variedades de cana-de-açúcar SP89-1115 e IAC87-3396 e encontrou aumentos significativos de P, tanto em superfície como em subsuperfície (Tabela 10.5), mostrando que esse resíduo é capaz de substituir a adubação fosfatada de fundação quando manejado adequadamente.

A aplicação de torta de filtro pode rapidamente imobilizar o N do solo. Há rápida imobilização de N quando a torta de filtro é aplicada em solo sem aplicação posterior de N. Recomenda-se, portanto, que as aplicações de torta de filtro sejam realizadas, quando possível, com a antecedência necessária para permitir a mineralização da matéria orgânica contida nesse resíduo (Freitas et al., 1988).

É frequente a aplicação de torta de filtro compostada por causa do enriquecimento em nutrientes que esse processo acarreta. Por exemplo, teores de P em torta de filtro in natura de 0,88 dag kg⁻¹ podem aumentar para 1,5 dag kg⁻¹ na torta compostada. Nessa compostagem, é possível adicionar cinzas de caldeira, fuligem e gesso agrícola, desde que em quantidades adequadas e balanceadas, obtendo-se fertilizante orgânico ou organomineral.

Há relatos de aplicação de torta de filtro seca em doses menores do que as que são recomendadas para aplicação in natura ou fresca, na

Tabela 10.5. Alterações nas características químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico em duas profundidades, após 60 dias da incorporação de torta de filtro aplicada localizadamente, em área total ou sem incorporação.

Torta de filtro (t ha ⁻¹)	Característica química				
	pH	P	Ca	Mg	M.O.
		(mg dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)		(g kg ⁻¹)
0–0,25 m					
0	5,17	9,0	2,09	0,70	2,0
30 ⁽¹⁾	5,34	9,2	2,17	0,73	2,0
60 ⁽²⁾	5,73	15,4	2,42	0,83	2,1
0,25–0,50 m					
0	4,72	10,8	1,70	0,57	1,4
30 ⁽²⁾	4,77	19,5	1,70	0,57	1,4
60 ⁽²⁾	5,24	23,4	1,97	0,69	1,6

⁽¹⁾Aplicação no sulco de plantio. ⁽²⁾Aplicação em área total.
Fonte: Adaptado de Nardin (2007).

faixa de 15 a 35 t ha⁻¹ (Albuquerque; Marinho, 1979; Castro; Godoy, 1979; Coletti et al., 1980). Nesses casos, a torta precisa ser humificada.

Vinhaça

A vinhaça resulta da produção de etanol hidratado, após a fermentação do mosto e a destilação do vinho (Figura 10.5). Trata-se de um resíduo com cerca de 2 a 6% de constituintes sólidos, com destaque para os elevados teores de matéria orgânica. Dos efluentes líquidos da agroindústria da cana-de-açúcar, a vinhaça é a que possui a maior carga poluidora, pois apresenta, em média, uma DBO de 16.950 mg L⁻¹ e uma demanda química de oxigênio (DQO) de 28.450 mg L⁻¹. Sua disposição em cursos d'água pode causar sérios impactos ambientais, principalmente pela eutrofização das águas, como observado por Silva et al. (2007) e em estudo realizado no rio Piracicaba por Botelho (2013). Penatti (2013) afirma que, quando aplicada nas áreas de produção de cana-de-açúcar, a vinhaça pode alterar propriedades químicas do solo, aumentando a disponibilidade de alguns nutrientes para as plantas. Além disso, pode pro-

mover modificações nas propriedades físicas do solo, melhorando a agregação e elevando a capacidade de infiltração de água, podendo até mesmo promover a lixiviação de íons e contaminar águas subterrâneas. Por sua vez, pode gerar a dispersão de partículas finas do solo (argila), reduzindo a capacidade de infiltração de água e aumentando o escoamento superficial, o que pode levar à contaminação de águas superficiais. Quando aplicada racionalmente, a vinhaça tem importante valor fertilizante no cultivo da cana-de-açúcar, pois concentra compostos minerais como K, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e S, elevando o seu teor de matéria orgânica.

Os teores de nutrientes na vinhaça estão diretamente relacionados com a origem do mosto que deverá ser fermentado e destilado (Tabela 10.6). Quando o mosto é proveniente do melaço (mel final que ocorre nas usinas de açúcar com destilaria anexa), a vinhaça apresenta maiores concentrações de matéria orgânica e K. Já quando o mosto tem origem no caldo de cana, como ocorre em destilarias autônomas, a vinhaça é mais diluída e apresenta uma considerável perda nutricional. A vinhaça resultante da fermenta-

Tabela 10.6. Características químicas de três tipos de vinhaça em alguns estados brasileiros.

Característica	Tipo de vinhaça por Estado											
	Melaço				Misto				Caldo			
	SP	RJ	PE	AL	SP	RJ	PE	AL	SP	RJ	PE	AL
pH	4,62	4,20	4,16	4,37	4,27	3,80	3,60	3,99	3,85	3,60	3,48	3,57
Matéria orgânica (%)	–	5,96	4,74	–	–	5,51	1,91	–	–	3,47	1,53	–
Cinzas (%)	–	1,73	1,49	–	–	0,98	0,92	–	–	0,54	0,64	–
C (%)	1,63	1,72	–	1,64	0,73	1,36	–	0,95	–	0,91	–	0,76
N (kg m ⁻³)	1,18	0,79	0,60	0,70	0,63	0,43	0,33	0,36	0,53	0,35	0,25	0,26
P ₂ O ₅ (kg m ⁻³)	0,18	0,14	0,22	0,34	0,11	0,14	0,24	0,61	0,10	0,11	0,18	0,49
K ₂ O (kg m ⁻³)	5,16	5,50	5,04	7,59	3,69	2,61	2,16	2,59	2,39	1,15	1,92	1,72
Ca (kg m ⁻³)	1,31	1,61	1,50	2,41	0,85	1,04	0,60	0,57	0,43	0,54	0,40	0,17
Mg (kg m ⁻³)	0,57	0,61	0,50	1,40	0,37	0,31	0,20	0,54	0,36	0,18	0,20	0,41
Zn (g m ⁻³)	–	3,09	4,30	2,92	–	49,79	2,20	1,89	–	2,28	2,80	1,84
Cu (g m ⁻³)	–	9,39	2,90	3,35	–	56,88	3,60	2,16	–	17,56	0,90	1,44
Mn (g m ⁻³)	–	11,06	6,70	5,54	–	5,50	5,90	1,90	–	3,28	5,10	6,03
Fe (g m ⁻³)	–	119,74	52,00	66,54	–	129,70	57,20	47,02	–	110,05	45,20	51,22

Fonte: Adaptado de Bolsanello e Vieira (1980), Medeiros (1981), Vasconcelos e Oliveira (1981) e Rossetto et al. (1984).

ção e destilação do mosto misto, que se compõe de melaço e caldo de cana, possui composição nutricional intermediária em relação aos outros tipos de mostos.

De maneira geral, não se observam grandes diferenciações na composição das vinhaças nas regiões canavieiras brasileiras, com exceção das quantidades de P observadas para a vinhaça no estado de Alagoas, no Nordeste do Brasil. Assim, a utilização desse resíduo em diferentes regiões brasileiras não deve ter alterações consideráveis, a não ser pela origem do mosto.

Com o aumento da produção de etanol no Brasil, também tem crescido vertiginosamente a produção de vinhaça, principalmente nas destilarias autônomas. Em 2006, a produção de vinhaça estava próxima de 200 bilhões de litros (Figura 10.5). No estado de São Paulo, desde 1967 é proibida a

disposição de vinhaça em rios, córregos e lagos. Assim se iniciou a destinação da vinhaça no solo. As usinas construíram tanques de acumulação, que são chamados de maracanãs, de modo a permitir o armazenamento de grandes volumes. Desses tanques, a vinhaça em estado de decomposição anaeróbica era destinada às áreas ditas de “inundação”, formando intensos alagados a fim de permitir sua infiltração no solo. Esses locais eram chamados de áreas de sacrifício.

Os elevados teores de K nesse resíduo, que podem ser observados na Tabela 10.6, fizeram com que Glória (1976) recomendasse seu uso como fertilizante. Essa mesma recomendação foi feita também pela Cooperativa de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Copersucar, 1979).

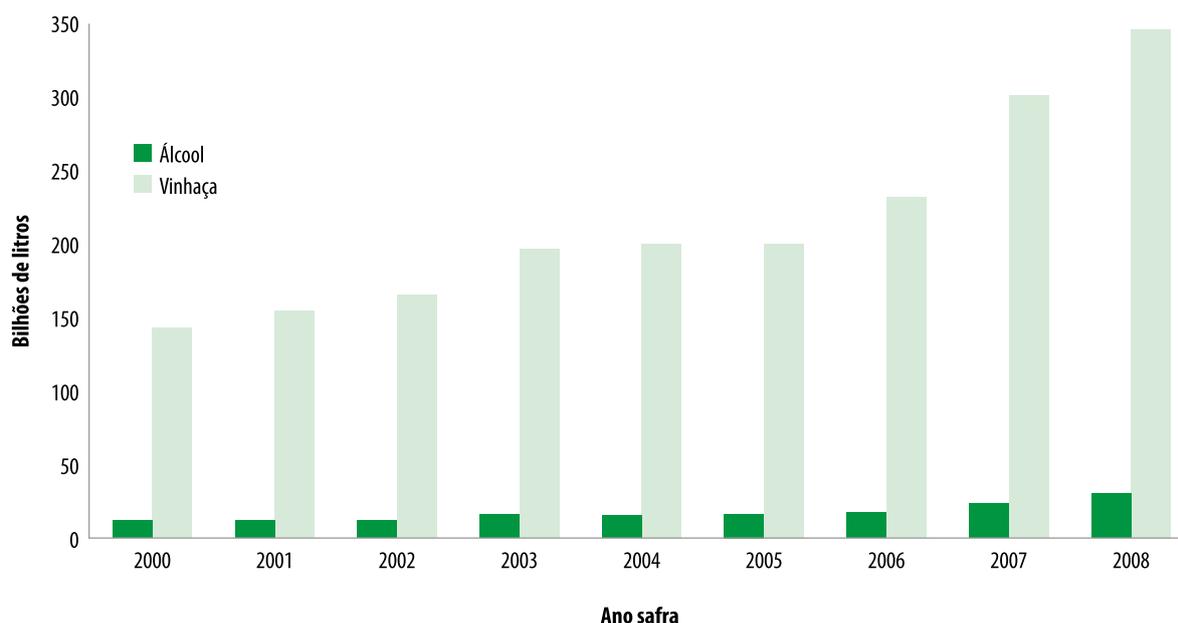


Figura 10.5. Evolução da produção de álcool e vinhaça na agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil.

Fonte: Adaptado do Observatório da Cana (2020).

Orlando Filho et al. (1983) calcularam a equivalência da vinhaça com fertilizantes minerais (ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio), mostrando a importância desse resíduo como fertilizante (Tabela 10.7).

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb), ligada à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, com base no documento normativo *Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola*, de dezembro de 2006, orienta, controla e monitora a aplicação de vinhaça ao solo no estado de São Paulo (Cetesb, 2006). Esse documento, que tem servido de base para outros estados brasileiros produtores de cana, açúcar e etanol, contém

critérios e procedimentos para armazenamento, transporte e aplicação no solo, bem como a instrução para a formulação de um plano para aplicação de vinhaça.

Entre as suas principais recomendações estão as seguintes:

- Impermeabilização por meio do revestimento de canais e tanques e construção de poços de monitoramento na área, eliminando, assim, os maracanãs e as áreas de inundação e sacrifício.
- A área a ser utilizada para a aplicação de vinhaça não deve estar contida em áreas de preservação permanente (APPs) nem em

Tabela 10.7. Equivalência entre 1 m³ de vinhaça de diferentes origens e fertilizantes minerais.

Tipo de vinhaça (1 m ³)	Fertilizante/Equivalência (kg)		
	Ureia	Superfosfato triplo	Cloreto de potássio
Mosto de melação	1,49	0,45	9,22
Mosto de caldo	0,89	0,60	4,47
Mosto misto	0,65	0,49	2,55

Fonte: Orlando Filho et al. (1983).

reserva legal, distando no mínimo 6 m delas, com proteção de terraços de segurança.

- c) A profundidade do aquífero livre deve ser de, no mínimo, 1,5 m no momento da aplicação de vinhaça.
- d) Em áreas com declives superiores a 15%, devem-se tomar medidas necessárias que evitem escoamento superficial. Por esse motivo, é recomendável não se aplicar vinhaça nessas áreas.

A dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada nos solos é determinada pela fórmula abaixo (Cetesb, 2006):

$$\text{Vinhaça (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)} = [(0,05 \times CTC - K_s) \times 3.744 + 185] / K_{vi}$$

em que 0,05 representa a saturação máxima de K admitida na capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (*CTC*) que é de 5%; *K_s* é o teor de K no solo até 0,80 m de profundidade ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); 3.744 é a constante para transformação de *K_s* em kg ha^{-1} de K; 185 é a quantidade de K_2O extraída pela cultura (kg ha^{-1}) que o sistema considera; *K_{vi}* é a quantidade de K_2O contida na vinhaça (kg m^{-3}).

Quando o limite de 5% da *CTC* é atingido, a aplicação de vinhaça restringe-se à reposição do que foi extraído pela cultura, considerando-se os 185 kg ha^{-1} por cada ciclo de cultivo.

Em geral, utilizam-se doses entre 100 e $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, de acordo com a concentração de K na vinhaça (Glória; Orlando Filho, 1984).

A porcentagem da área de fertirrigação com vinhaça das usinas é bastante variável, tanto em escala regional quanto dentro de uma mesma região. Existem usinas que vêm aplicando vinhaça em 70% da sua área de cultivo. No entanto, há usinas com aplicação bem abaixo desse percentual.

Os sistemas utilizados atualmente para fertirrigação da lavoura canavieira, com efluentes líquidos (vinhaça e águas residuárias), são os seguintes: caminhão-tanque convencional e aplicação por aspersão. Na aplicação por aspersão, são utilizados os sistemas de montagem direta e autopropelido com carretel enrolador, podendo esse ser alimentado diretamente de canais ou a partir de caminhões.

O sistema de fertirrigação com caminhões-tanque era o mais difundido para distribuição de vinhaça (Figura 10.6). Apresenta como vantagem o curto tempo exigido para sua implantação, isto é, basta adquirir a frota e colocá-la em operação. Como limitações desse sistema, destacam-se os seguintes: agravamento dos problemas de compactação de solos, impossibilidade de aplicação em áreas com cana-planta, dificuldades na operação em dias de chuva, baixa uniformidade de distribuição e pequena distância para a qual a prática da fertirrigação é economicamente viável, em comparação com a adubação mineral.



Foto: André Elia Neto

Figura 10.6. Distribuição da vinhaça por meio de caminhão-tanque/aplicadora.

O sistema por aspersão (Figura 10.7), conhecido como montagem direta, consiste basicamente em um conjunto motobomba acoplado a um aspersor tipo canhão, montado em um chassi com rodas. A vantagem principal desse sistema é o

menor custo por unidade de área fertirrigada. No entanto, a maior limitação é a exigência de uma rede de canais alimentadores, o que requer uma sistematização parcial do terreno e recortes do canavial, isso quando a implantação não é realizada na época correta ou na reforma do canavial.

Foto: André Elia Neto



Figura 10.7. Aplicação de vinhaça por aspersão feita por um conjunto motobomba instalado ao longo de um canal.

O sistema autopropelido com carretel enrolador (Figura 10.8) é o mais difundido atualmente nas usinas e destilarias. A vantagem principal desse sistema é o fato de ser semimecanizado, o que resulta em uma considerável redução de mão de obra. No entanto, exige maior potência da motobomba e, conseqüentemente, consome mais combustível.

Como evolução dos sistemas de aplicação de vinhaça, pode-se considerar a utilização de sistemas do tipo pivô central e a aplicação por



Foto: André Elia Neto

Figura 10.8. Detalhe do canal condutor de vinhaça – motobomba acoplada ao carretel enrolador.

meio de gotejamento subsuperficial, bem como a aplicação de vinhaça localizada (Figura 10.9).

Para aplicar essa vinhaça localizada de forma eficiente, o setor passou a contar com tecnologia especializada: tanques de fibra de vidro traçados por tratores, que permitem a aplicação da vinhaça de forma localizada na linha da cana e na quantidade certa. Também é possível adicionar a essa vinhaça outros nutrientes, fazendo uma adubação mais completa e de maior aproveitamento.

A vinhaça é transportada em caminhões-tanques até os canaviais que serão fertirrigados. Em seguida, é transferida para os tanques traçados por trator, que possuem uma barra com saídas direcionadas nas linhas da cana. O trator traciona esse tanque, que oferece maior precisão às aplicações, gerando maior benefício para

Fotos: Mauro Sérgio Nominato



Figura 10.9. Aplicação localizada de vinhaça com trator (A) e transferência da vinhaça do caminhão para o tanque do trator (B).

a planta. Esse método permitiu às usinas utilizarem a fertirrigação em 100% dos canaviais (Leal et al., 1983; Neves et al., 1983; Glória; Orlando Filho, 1984; Sengik et al., 1988; Lara Cabezas et al., 1994; Có Júnior et al., 2008).

Muitas pesquisas realizadas demonstram o efeito da vinhaça nas características químicas, físicas e biológicas do solo (Almeida et al., 1950; Ranzani, 1956; Rossetto et al., 1978; Coleti et al., 1981; Rosenfeld et al., 1981; Amaral Sobrinho et al., 1983; Leal et al., 1983; Neves et al., 1983; Orlando Filho et al., 1983; Glória; Orlando Filho, 1984; Azeredo et al., 1984; Camargo et al., 1984; Minihoni; Cerr, 1987; Sengik et al., 1988; Lara Cabezas et al., 1994; Có Júnior et al., 2008; Bebé et al., 2009; Barros et al., 2010; Miranda et al., 2012).

Resumidamente, os efeitos incluem a elevação do pH do solo (Figura 10.10), o enriquecimento em cátions trocáveis (Ca, Mg e K) no solo (Figura 10.11) e a influência na neutralização do Al trocável do solo (Figura 10.12).

Em sua avaliação ecotoxicológica da vinhaça, Alves (2015) verificou que o incremento de doses de vinhaça afasta minhocas e colêmbolos e pode inibir sua reprodução. Os ácaros foram menos sensíveis e houve crescimento da biomassa microbiana de carbono (BMC), metabolismo microbiano (C-CO₂) e colonização dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) nas raízes. Por

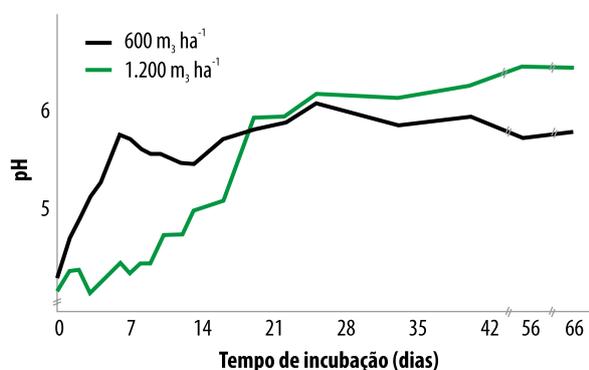


Figura 10.10. Elevação e variação do pH do solo em função do tempo de incubação com vinhaça nas doses de 600 e 1.200 m³ ha⁻¹.

Fonte: Adaptado de Neves et al. (1983).

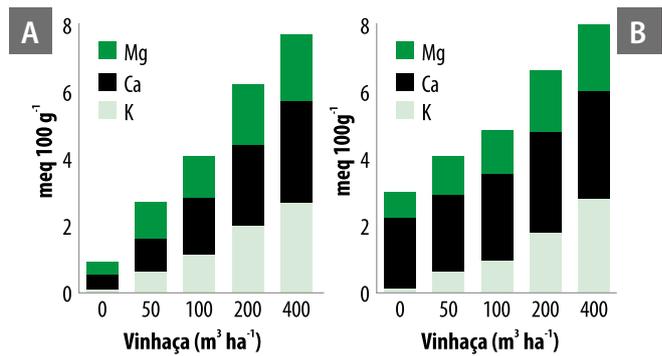


Figura 10.11. Teor de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) no complexo de troca de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (A) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (B) em função da aplicação de diferentes doses de vinhaça.

Fonte: Adaptado de Sengik et al. (1988).

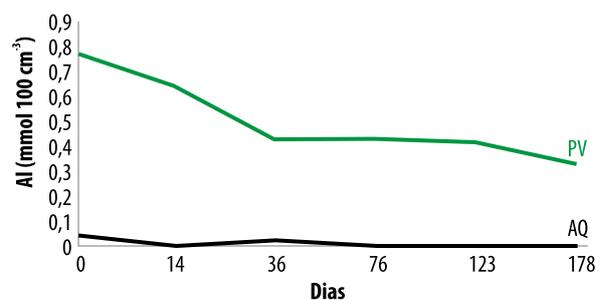


Figura 10.12. Teor de alumínio trocável em função da aplicação de 500 m³ ha⁻¹ de vinhaça em Argissolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico.

Fonte: Adaptado de Mattiazzo e Glória (1985).

sua vez, a estrutura da comunidade bacteriana sofreu redução de sua riqueza e diversidade. Os efeitos deletérios para a fauna do solo foram atribuídos ao alto teor de sais, especialmente de K.

Nunes et al. (1981) pesquisaram o efeito de doses de vinhaça (50, 100, 150, 200 e 400 m³ ha⁻¹) sobre as propriedades químicas de um solo em condições de laboratório. Os autores observaram que N-total, C e C:N não se alteraram; K, Ca e Mg tiveram aumentos em seus teores de acordo com o aumento das doses de vinhaça; enquanto os teores de Ca e Mg aumentaram mais do que foi incorporado pela vinhaça. Também, de acordo com o incremento das doses, houve aumento do pH, neutralização do Al⁺³ trocável e redução dos teores de P assimilável e de NO₃⁻.

Martins (2012) estudou os efeitos da aplicação de vinhaça sobre um Latossolo fase arenosa e afirmou que a vinhaça melhorou seus atributos químicos e aumentou os teores de alguns nutrientes como K e P. Indiretamente, promoveu efeitos positivos em atributos físicos como a estabilidade de agregados. Ainda minimizou efeitos de período seco sob a atividade microbiana, favoreceu o desenvolvimento de fungos e interferiu na atividade microbiana no período seco.

No entanto, alguns efeitos negativos no solo são atribuídos à aplicação de vinhaça, principalmente quando utilizada em altas doses. Entre eles destacam-se a salinização, o aumento da saturação de K, com consequente desbalanço de cátions, e a formação de complexos orgânicos que podem causar lixiviação de íons, como, por exemplo, o nitrato.

A salinização pode provocar dispersão de argilas e diminuição da permeabilidade do solo, afetando a disponibilidade de água no canal. Isso significa que a cana-de-açúcar tratada com vinhaça pode ter sua resistência à seca reduzida, o que é significativamente importante, principalmente em veranicos. A saturação de K no complexo de troca pode se elevar demasiadamente, aumentando as relações K:Ca e K:Mg quando são utilizadas doses elevadas de vinhaça. Camargo et al. (1984) mostraram que essa saturação pode chegar a valores aproximados de 15% quando se aplicam doses de vinhaça equivalentes a $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Isso é três vezes mais que a saturação por K máxima permitida pela Cetesb em canaviais paulistas. Nesse mesmo trabalho, os pesquisadores encontraram altas lixiviações de cátions, principalmente de K, Ca e Mg, atingindo 82% da quantidade aplicada de K abaixo dos 0,8 m de profundidade, quando utilizadas doses de $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça.

Em solos com problemas de elevadas saturações de K, o emprego de gesso tem sido uma alternativa viável. É necessário, no entanto, cau-

tela em relação às quantidades necessárias para essa correção, para que o gesso seja aplicado parceladamente, e não em uma única dose, que geralmente é superior a 10 t ha^{-1} . A correção desses desequilíbrios de cátions é uma intervenção de médio a longo prazo para que o problema seja resolvido de maneira adequada.

Para Rossetto (2006), a vinhaça apresenta alto poder fertilizante, porém tem também alto poder poluidor. Com isso, nem todo o resíduo produzido pode ser utilizado diretamente como fertilizante, principalmente in natura. Por exemplo, a restrição da Cetesb ao uso de vinhaça em solos que apresentam saturação por K acima de 5% restringe seu uso, tornando necessária a busca por alternativas

Almeida (2015) afirma que o sistema misto de transporte da vinhaça à lavoura é o que tem proporcionado resultados melhores às usinas. Para que a aplicação na lavoura por caminhões-tanque seja realizada de maneira econômica, foi desenvolvido o sistema chamado de pré-concentração da vinhaça. Isso permite reduzir a quantidade de vinhaça por litro de álcool de 13 a 16 L para 7 a 8 L, diminuindo significativamente os custos do transporte por caminhões. A pré-concentração é feita em evaporadores do tipo *falling film* de mono ou múltiplos efeitos, utilizando como fonte de energia o vapor de escape ou o vapor vegetal do processo de destilação existente. Os condensados obtidos podem ser reutilizados no processo industrial, reduzindo a necessidade de captação de água. Apresenta-se como alternativa a concentração da vinhaça para a produção de biofertilizantes ou a queima em caldeiras. Nesta última, a vinhaça é concentrada a 50 por 60 °Brix, também em evaporadores do tipo *falling film* de múltiplos efeitos, normalmente tubulares.

Os mesmos autores exemplificam que, considerando-se o caso da pré-concentração da vinhaça, para a produção de 600 mil litros de

etanol por dia, no processo convencional, produzem-se também $8.400 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de vinhaça. Se a quantidade de vinhaça for reduzida pela metade, retiram-se aproximadamente 175 m^3 por hora de água ($4.200 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$), que poderia ser utilizada no processo. Com isso, o teor de sólidos dissolvidos passaria de 3,0 para 6,0% (m/m) e a quantidade de vinhaça passaria de $14,0 \text{ L L}^{-1}$ de álcool para $7,0 \text{ L L}^{-1}$ de álcool. Assim, considerando um caminhão-tanque de 50 m^3 , o número de viagens por dia seria reduzido de 168 para 84. Se a concentração da vinhaça fosse de 50 °Brix, a quantidade de água retirada seria de $7.896 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (329 m^3 por hora).

Outra utilização da vinhaça seria na produção de biofertilizantes, que consiste em concentrar a vinhaça até a obtenção de um composto organomineral constituído da vinhaça concentrada e dos demais subprodutos que são produzidos na usina: torta dos filtros, fuligem e cinzas da caldeira, resíduos da limpeza da cana e outros. Esse composto, depois de analisado, receberia, se necessário, outros sais minerais, o que resultaria num adubo organomineral para a cultura da cana-de-açúcar (Almeida, 2015).

A produção de biogás pela biodigestão da vinhaça foi apresentada às usinas na década de 1970. No entanto, não houve interesse devido ao longo tempo necessário para a biodigestão, que exigia enormes reatores, e aos custos elevados de implantação. Todavia, há enormes vantagens, como a produção de gás metano (CH_4) de alto valor energético ($\text{PCI} = 8.500 \text{ Kcal Nm}^{-3}$). Além disso, N, P e K permanecem na vinhaça biodigerida, permitindo seu uso na fertirrigação das plantações de cana. A vinhaça biodigerida depois da eliminação do ácido sulfídrico (H_2S) apresenta baixa agressividade para o aço, o que permite que seja concentrada em evaporadores de aço carbono e utilizada na fabricação de biofertilizantes. O lodo do biodigestor pode ser utilizado como adubo orgânico (Almeida, 2015).

Ao reduzir o tempo de biodigestão para 20 horas, as novas tecnologias voltaram a ser atrativas. A biodigestão anaeróbica da vinhaça consiste na degradação da matéria orgânica da vinhaça por meio de fermentação com diversos gêneros de bactérias anaeróbicas acetogênicas, que transformam parte da matéria orgânica em gases (basicamente metano e gás carbônico). Esse processo utiliza a vinhaça in natura e é realizado em grandes reservatórios (biorreatores), além de reduzir a carga orgânica (DBO) em 70%.

Dessa forma, a vinhaça com concentração de 25 a 30 kg de DQO por metro cúbico tem sua carga orgânica reduzida para 7,5 a 9,0 kg de DQO por metro cúbico, além de produzir biogás na ordem de 8,0 a 10,0 m^3 por Nm^3 de vinhaça, com uma concentração de metano no biogás de 60 a 65%. Existem seis aplicações para o gás metano, e as duas últimas citadas ainda estão em fase de pesquisa:

- a) Combustível em veículos — necessita ser purificado e concentrado para que seja obtida uma mistura com no mínimo 95% de metano. Necessita ser comprimido a 150/200 atm. Nessa fase, o gás é chamado de biometano. A queima em motores do ciclo diesel vem sendo aperfeiçoada, não havendo necessidade de modificações nos motores.
- b) Queima em caldeiras — a queima direta em caldeiras necessita também de uma purificação para a eliminação do S, que é altamente corrosivo.
- c) Combustível para secagem do creme de levedura, desviado do processo de fermentação para obtenção de ração (concentrado proteico).
- d) Queima do biogás em motores estacionários para gerar energia elétrica.
- e) Queima do biogás em turbinas a gás, também para gerar energia elétrica.

f) Queima do biogás em turbinas a gás no ciclo combinado, gerando energia elétrica para aproveitar o calor dos gases do escape em caldeira de recuperação (Almeida, 2015).

Na alimentação animal, Gorni et al. (1987) concluíram que a adição de vinhaça concentrada nas rações, no intervalo de 4, 8 e 12% (m/m), manteve o desempenho e as características de carcaça de suínos nas fases de crescimento e terminação.

Arrigoni (1993), em pesquisa que utilizou vinhaça em substituição à água na terminação de bovinos confinados, observou que a vinhaça associada ao bicarbonato de sódio mais óxido de magnésio melhorou o desempenho dos bovinos no confinamento, podendo substituir a água na dessedentação.

Hidalgo et al. (2011) mostraram que a vinhaça como aditivo alternativo na alimentação de aves melhorou o peso vivo dos animais. Os autores concluíram que o uso da vinhaça como

aditivo alimentar para as aves pode otimizar o uso dos nutrientes da dieta e propiciar melhor comportamento produtivo e reprodutivo, trazendo mais saúde, maior produtividade e retorno econômico ao reduzir o número de mortes e melhorar a eficiência na produção.

Há duas alternativas principais para o tratamento da vinhaça: biodigestão para produção de biogás e concentração. A Tabela 10.8 apresenta a composição da vinhaça in natura e concentrada, aplicada em lavouras de cana-de-açúcar (Albers, 2007). O uso da vinhaça concentrada oferece algumas soluções, tais como: a) o condensado com água é aproveitado na embebição de moendas e para outros fins; b) evita a contaminação do lençol freático; e, c) reduz os custos de deslocamento pela facilidade de transporte para distâncias maiores. Outra vantagem da vinhaça concentrada é o modo de aplicação no campo, uma vez que permite a aplicação sobre as leiras de cana-de-açúcar, levando ao aumento

Tabela 10.8. Composição de vinhaça in natura e concentrada utilizadas nas lavouras de cana-de-açúcar.

Propriedade	Unidade de medida	In natura (4% Brix)	Brix a 35%	Brix a 65%
pH		4,4–4,6	4,6–5,0	4,6–5,0
Temperatura	(°C)	80–100	50–60	50–60
DBO	(mg L ⁻¹)	19.800	173.250	321.750
DQO	(mg L ⁻¹)	45.000	393.750	731.250
Sólidos totais	(mg L ⁻¹)	52.700	461.125	856.375
Sólidos solúveis	(mg L ⁻¹)	40.000	350.000	650.000
Sólidos insolúveis	(mg L ⁻¹)	12.700	111.125	206.375
Nitrogênio (N)	(mg L ⁻¹)	480–710	4.200–6.213	7.800–11.538
Fósforo (P ₂ O ₅)	(mg L ⁻¹)	9–200	79–1.750	146–3.250
Potássio (K ₂ O)	(mg L ⁻¹)	3.340–4.600	29.225–40.250	54.275–74.750
Cálcio (CaO)	(mg L ⁻¹)	1.330–4.570	11.638–39.988	21.613–74.263
Magnésio (MgO)	(mg L ⁻¹)	580–700	5.075–6.125	9.425–11.375
Sulfato (SO ₄)	(mg L ⁻¹)	3.700–3.730	32.375–32.637	60.125–60.612
Relação vinhaça/álcool	(L L ⁻¹)	12	1,4	0,74

Fonte: Albers (2007).

da área de aplicação e ao ganho econômico pelo transporte.

Barbosa et al. (2006) utilizaram a vinhaça concentrada em doses equivalentes de 0, 180 e 270 kg ha⁻¹ de K e combinaram diversas doses e formulações de adubos minerais em Argissolo Vermelho-Amarelo. Os autores concluíram que houve aumento de produtividade sem alteração significativa das variáveis tecnológicas do caldo. De acordo com Albers (2007), a aplicação de vinhaça em soqueira de cana-de-açúcar, entre 90 e 120 m³ ha⁻¹ representa doses médias de 608, 417 e 175 kg ha⁻¹ de K₂O para a vinhaça de melaço, misto e caldo de cana, respectivamente. Considerando-se a vinhaça concentrada a 35%, para atingir 185 kg ha⁻¹ de K₂O é necessária a aplicação de 5,3 m³ ha⁻¹, que poderia ser feita por aspersão.

A concentração da vinhaça eleva seu poder fertilizante, permitindo a expansão de área e tornando viáveis aplicações em até 100 km de distância de onde é produzida, além de ser mais facilmente armazenada e usada em qualquer época (Albers, 2007). O grande desafio é o custo imobilizado na concentradora e sua integração à indústria sucroalcooleira.

Tratamento agroindustrial

Biodigestão da vinhaça

A biodigestão anaeróbica é uma alternativa de aproveitamento da vinhaça por ser economicamente viável e tratar-se de um efetivo meio de remoção da carga orgânica com a produção de biogás (Wilkie et al., 2000). Outra vantagem da digestão anaeróbica, quando comparada ao tratamento aeróbico convencional, é a baixa produção de lodo (Speece, 1983; Stafford, 1992).

A biodigestão anaeróbica é uma resposta recente às alternativas de aproveitamento da vi-

inhaça, pois permite a estabilização da matéria orgânica com desassimilação de uma mistura gasosa, tendo como componentes principais o metano e o dióxido de carbono (Gurgel, 2009a).

Sabe-se que vários grupos de microrganismos que produzem metano em substratos adequados atuam no processamento contínuo. Tais microrganismos estão presentes na natureza em ambientes anaeróbios, como fundos de lagoas, pântanos, rúmen de herbívoros e fezes de animais e humanos (Gurgel, 2014).

De acordo com Gurgel (2012), o processo de biodigestão anaeróbica ocorre em duas etapas. Na primeira, estão envolvidas bactérias fermentativas, não produtoras de metano, que atuam por hidrólise extracelular e quebram polímeros orgânicos em suas unidades fundamentais, incorporando e fermentando esses produtos de hidrólise em ácidos orgânicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. No segundo estágio, tais produtos são transformados em metano e dióxido de carbono, por meio da ação das bactérias acetogênicas e metanogênicas.

As bactérias metanogênicas, em relação às bactérias produtoras de ácidos, reproduzem-se mais lentamente e são mais sensíveis às alterações das condições ambientais ou condições adversas, como a presença de compostos inibidores.

Como a vinhaça em geral encontra-se disponível em temperaturas entre 80 e 100 °C, não há problema de consumo energético para a manutenção da temperatura do processo, pois esse é realizado em biodigestores do tipo Uasb (*upflow anaerobic sludge blanket*), ilustrado na Figura 10.13, operando na faixa termofílica de trabalho.

Para viabilizar os processos biológicos para tratamentos dos efluentes industriais, são necessários equipamentos com grande capacidade de tratamento, além de boa eficiência na remoção

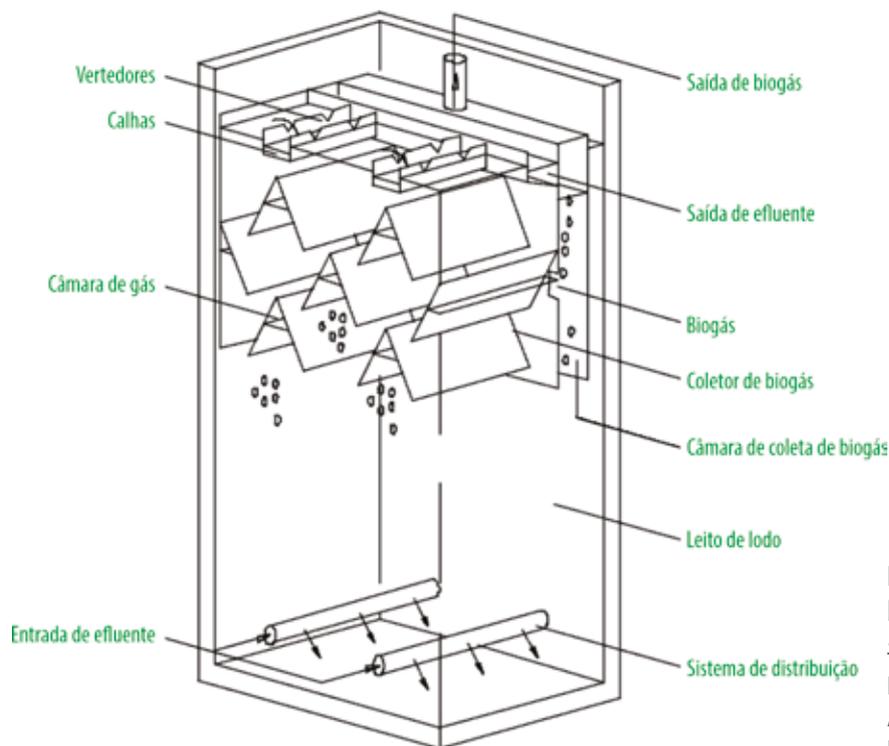


Figura 10.13. Reator anaeróbico Uasb (*upflow anaerobic sludge blanket*).
 Ilustração: Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel
 Fonte: Gurgel (2009b).

dos dejetos orgânicos. Na prática, isso significa que um reator industrial deverá ser capaz de trabalhar com altas taxas de carregamento orgânico e baixo tempo de retenção. Os parâmetros que determinam a capacidade de um reator anaeróbico podem ser classificados em fatores microbiológicos e físicos, conforme mostrado na Tabela 10.9 (Gurgel, 2014).

Os fatores microbiológicos estão ligados aos parâmetros fisiológicos, tais como temperatura, pH, alcalinidade e presença de compostos inibidores. Nos últimos anos, foram feitos muitos estudos para que fosse determinada a influência de cada um desses parâmetros no processo de

produção de biogás. Portanto, já estão especificados os valores ótimos e as faixas de tolerância para vários tipos de efluentes (Gurgel, 2014).

A limitação para um melhor aproveitamento desse potencial microbiano está relacionada a projetos de reatores anaeróbicos, principalmente aos aspectos físicos: capacidade de retenção dos microrganismos e contato do efluente/microrganismo.

Se o contato dos microrganismos com os efluentes for pouco eficiente, a transferência de massa será prejudicada, e não se poderá utilizar todo o potencial da atividade específica metanogênica da biomassa ativa presente no reator anaeróbico. A taxa de lodo (quantos quilogramas de DQO cada quilograma de lodo pode tratar por dia) estará muito abaixo dos valores teóricos esperados.

Esse contato pode ser melhorado com a expansão ou fluidização do leito de lodo granulado, por meio da aplicação de maiores velocidades de ascensão de efluentes ou biogás (aumentando a relação altura/diâmetro do reator e aplicando recirculação de parte do efluente tratado), chegando ao conceito dos reatores anaeróbicos de leito

Tabela 10.9. Fatores que definem a capacidade de tratamento de um reator anaeróbico.

Fator microbiológico	Fator físico
Atividade microbiana	Capacidade de detenção de microrganismos
Crescimento microbiano	Contato efluente/Microrganismos

Fonte: Gurgel (2009b).

expandido (do inglês *expanded granular sludge bed* – EGSB) (Gurgel, 2014). Entre os vários projetos do tipo EGSB que visam eliminar as deficiências encontradas nos reatores Uasb, destaca-se o reator anaeróbio de circulação interna (IC), por sua engenhosidade e simplicidade construtiva.

O reator IC (Figura 10.14) é baseado na instalação de dois reatores Uasb sobrepostos. O reator inferior recebe alto carregamento orgânico e o superior carga muito baixa. Sua vantagem principal é a segregação do biogás em um dos setores dentro do reator. A coleta do biogás na parte superior proporciona o arraste (*gas-lift*) do efluente e lodo anaeróbio para o topo do reator, onde é segregado e internamente circulado para a parte inferior dele, procedimento esse que lhe confere o nome (Gurgel, 2014).

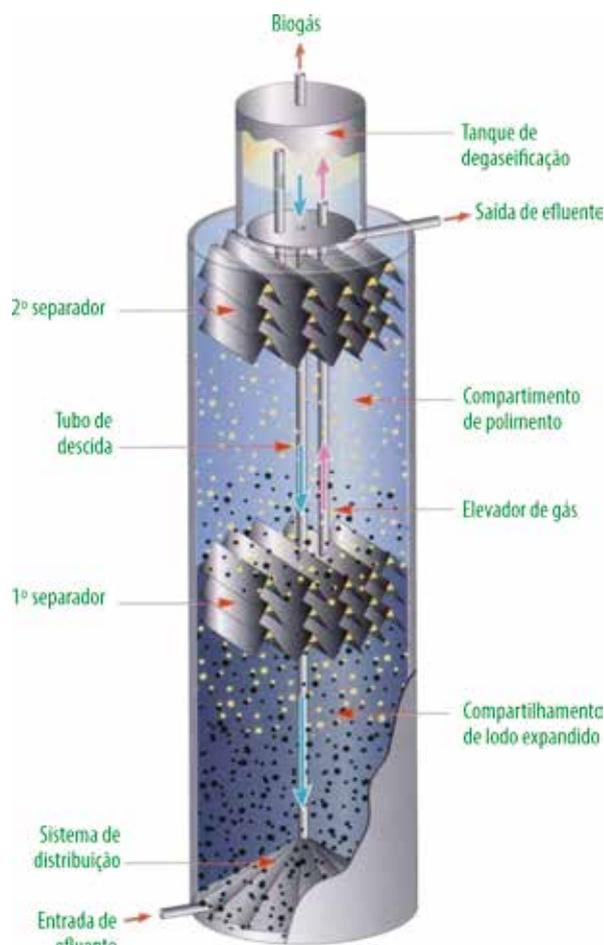


Figura 10.14. Reator anaeróbio de circulação interna.

Ilustração: Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel
Fonte: Gurgel (2014).

Quanto à implantação de unidades industriais, o comissionamento depende fundamentalmente da disponibilidade de lodo bacteriano já adaptado à vinhaça, com adequação das características de atividade e decantabilidade. Acrescente-se ainda que grandes quantidades de lodo são necessárias para a inoculação das unidades industriais (Olivério; Boscarior, 2013; Gurgel, 2014).

Concentração de vinhaça – histórico e aspectos gerais

Desde os primórdios do Proálcool, nos anos 1970, a vinhaça tem sido uma preocupação constante, tanto pelo seu alto potencial poluidor, consequência de sua composição físico-química e do grande volume gerado no processo de produção de etanol, quanto pela possibilidade de sua utilização como mais uma fonte de rendimentos para a agroindústria. Felizmente, para as usinas e para o ambiente, a vinhaça hoje é vista mais como um subproduto rentável da produção de etanol do que como um efluente com poder contaminante.

Uma das responsáveis pelo custo de produção altamente competitivo da cana-de-açúcar brasileira, diante das outras matérias-primas utilizadas ao redor do mundo, a vinhaça fez da cana o único produto agrícola praticamente autossuficiente em adubação do solo. Substituiu quase que totalmente o uso de fertilizantes minerais na lavoura, aumentando os seus rendimentos agrícolas e ampliando a quantidade de cortes produtivos (Gurgel, 2014).

O custo da fertirrigação está sendo constantemente reduzido por novas e mais modernas técnicas de transporte e aplicação de vinhaça, seja por carretas e até por “treminhões” com tanques de grande volume, seja por tubulações disponíveis em novos materiais com maior resistência mecânica e à corrosão.

Os primeiros registros sobre concentração de vinhaça iniciam-se em 1954, quando a empresa austríaca Vogelbusch desenvolveu o primeiro concentrador, que usava evaporadores inclinados do tipo termossifão. Logo depois, a mesma Vogelbusch apresentou o evaporador do tipo *falling film* (ou película fina), no qual o líquido a evaporar escorre com alta velocidade pelas paredes internas dos tubos do trocador; com isso, seu tempo de permanência em contato com o vapor de aquecimento é reduzido, favorecendo a resistência às incrustações. Esse tipo de evaporador, que se revelou logo como o mais indicado para suportar líquidos com alto teor de sais incrustantes como a vinhaça, tem sido utilizado até hoje, além de ser difundido para uso nos evaporadores de caldo nas usinas brasileiras.

No Brasil, no início do Proálcool, duas unidades de concentração de vinhaça foram instaladas. Uma delas, a Usina Tima, em Pernambuco, então pertencente ao Grupo Votorantim, foi projetada por uma empresa nacional, a Borag, fornecedora de equipamentos para indústrias de suco, que funcionava integrada à destilaria de etanol. O sistema não obteve êxito devido aos problemas de incrustações e às frequentes paradas para limpeza, que atrapalhavam o funcionamento da destilaria. Tanto esse sistema de concentração como a própria usina se encontram hoje desativados.

A outra unidade foi instalada em Sertãozinho, no estado de São Paulo, na Usina Santa Elisa, em 1976, pela Conger S. A., então licenciada da Vogelbusch. O concentrador de vinhaça foi desenvolvido para um aparelho com capacidade de produção de 120 mil litros de etanol por dia. Na época, utilizando melaço para fermentação, sem prever a utilização de caldo direto, o projeto da concentração foi elaborado para alimentação de $70 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de vinhaça com 6% de sólidos, concentrando-a até 60°Brix .

Essa concentração operava em quádruplo efeito, utilizando um termocompressor de vapor

a $8,0 \text{ kgf cm}^{-2}$, o que resultava em um balanço similar a um quádruplo efeito, com um consumo de 13 t h^{-1} de vapor direto rebaixado. Seu condensador final era do tipo barométrico, com bomba de vácuo, e os vapores a serem condensados do último efeito tinham contato direto com a água utilizada, o que causava alguns problemas pela contaminação apresentada no circuito de água das torres de resfriamento. Esse problema foi resolvido na época, utilizando-se no condensador a água decantada do sistema de lavagem de cana, com uma vazão de $450 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O consumo de energia elétrica na planta era de 400 kWh para a produção final de $5,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de vinhaça concentrada, o que equivale em peso a $7,0 \text{ t h}^{-1}$ do produto concentrado com densidade aproximada de $1,40 \text{ kg m}^{-3}$. Essa quantidade de vinhaça, se incinerada, produziria cerca de 1.400 kg h^{-1} de cinzas calcinadas.

A unidade ficou parada por causa do alto consumo de energia. Todavia, em 1999, com a implantação do sistema de cogeração de energia elétrica na usina, a unidade passou a funcionar continuamente, produzindo cerca de $3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de vinhaça concentrada. O sistema permitiu que a usina reduzisse o custo de transporte da vinhaça para as regiões mais afastadas e pudesse ter a flexibilidade de dosar a concentração de cada aplicação de vinhaça, conforme as características do solo. Para a aplicação da vinhaça concentrada ao solo, foi desenvolvido um caminhão-tanque com bomba de pressurização e barra aplicadora, de 7 m de largura, o que possibilitou a aplicação em cerca de 5 mil hectares (Barbosa, 2006; Biase, 2007).

Os evaporadores do primeiro ao terceiro efeito eram do tipo película fina de fluxo descendente, os quais possuíam controle automático de fluxo para injeção rápida de água quente para lavagem dos tubos se houvesse falta de líquido, como nos casos de falta de energia elétrica, parada das bombas mecânicas ou entupimento de

tubulações. O trocador do último efeito era do tipo recirculação forçada (ou flash), a fim de possibilitar a operação no estágio final de concentração de 45 a 60 °Brix, a fase em que, naturalmente, ocorrem os maiores problemas de incrustações.

A limpeza química era feita com ácido nítrico a 3%. Os problemas comuns de uma nova unidade com uma nova tecnologia sendo colocada em operação, como, por exemplo, problemas mecânicos de cavitação em bombas, não impediram a entrada em regime operacional contínuo e não dificultaram o aprendizado em relação ao trabalho com as limpezas e incrustações.

Em 1984, a destilaria Santa Isabel, em Novo Horizonte, estado de São Paulo, instalou um conjunto de evaporação misto, considerado como um pré-concentrador de vinhaça, comercialmente denominado Reduger. Nesse conjunto, os dois primeiros corpos de evaporação operavam como um pré-evaporador de caldo, elevando-o até 25 °Brix e permitindo sua posterior diluição com as águas condensadas dos três corpos finais, que operavam com concentração da vinhaça dos aparelhos de destilação de até 15 °Brix. Esse conjunto permitia uma redução de até 50% do volume total de vinhaça produzido, que era distribuído por caminhões na fertirrigação das lavouras.

Redução e concentração

Apesar de parecer uma redundância, é importante ter em mente essa diferença conceitual entre o que se pode fazer com a vinhaça depois de produzi-la no aparelho de destilação fracionada, considerando todos os aspectos técnicos e as implicações financeiras que cercam a instalação de um concentrador de vinhaça. É lógico que, ao partir para uma solução de alto nível tecnológico e de investimentos como esse, deve-se esgotar no processo industrial todas as possibilidades de redução do volume de vinhaça produzida a ser concentrada. Algumas dessas soluções parecem bastante simples e de

baixo custo, outras exigirão criatividade e novos investimentos, mas sempre deverão preceder à instalação do concentrador.

A instalação de aquecedores indiretos nas colunas de destilação e o uso de colunas de esgotamento de flegmas para produção separada de flegmaça e vinhaça já foram práticas comuns nas destilarias, as quais talvez tenham sido esquecidas ou abandonadas ao longo do tempo, mas que poderão ser retomadas.

O uso das flegmaças para lavagem de dornas, a reposição de sistemas de água, as diluições e as embebições são medidas fáceis de ser viabilizadas, as quais podem representar uma grande ajuda na redução do volume de efluentes.

Concentração de vinhaça

A vinhaça in natura possui teores de sólidos muito baixos, que variam de 2 a 10%, conforme a matéria-prima utilizada na fabricação de etanol. Nos processos em que só o caldo extraído é utilizado na fabricação de etanol, o teor de sólidos da vinhaça é normalmente mais baixo, resultando em volumes ainda maiores de vinhaça a ser descartada pela destilaria. Esse enorme volume de vinhaça acarreta custos de transportes também elevados.

Assim, são conhecidos três meios tecnológicos principais de diminuir a proporção de vinhaça em relação ao etanol produzido nas destilarias: concentração, digestão e organominerais.

Concentrar a vinhaça significa retirar água desse efluente, sem perda dos sólidos nela contidos, com conseqüente redução de volume. Essa redução, tomada em função da concentração (expressa em termos de °Brix), assume a forma de curva assintótica (Germek; Feigl, 1987 citado por Freire; Cortez, 2000), conforme ilustrado na Figura 10.15. O raio econômico de aplicação da vinhaça em função da concentração está na Figura 10.16.

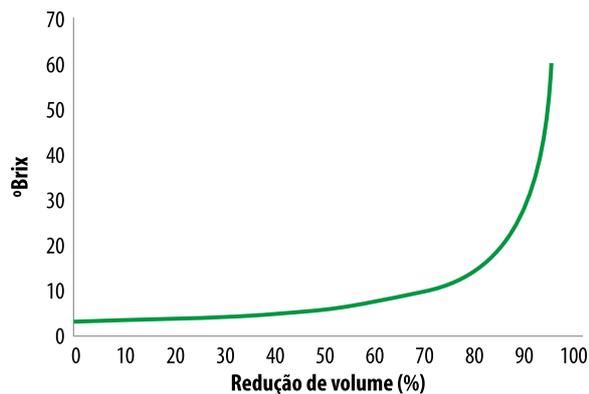


Figura 10.15. Relação entre o valor de Brix (°Brix) e a redução de volume (%) da vinhaça.

Fonte: Germek e Feigl (1987) citado por Freire e Cortez (2000).

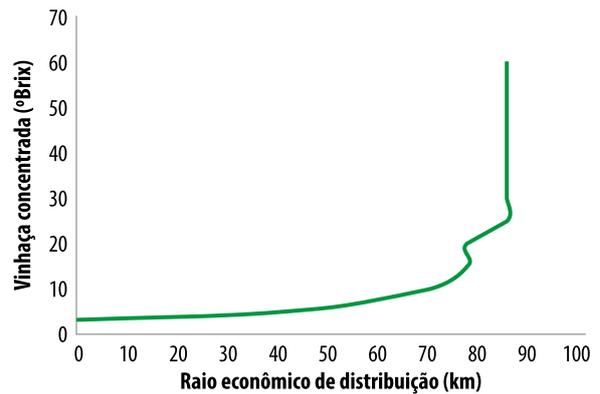


Figura 10.16. Raio econômico de aplicação da vinhaça em função da concentração.

Fonte: Germek e Feigl (1987) citado por Freire e Cortez (2000).

A vinhaça in natura fica restrita às áreas próximas da usina e quanto mais distante a lavoura, melhor o uso da concentração da vinhaça (questão econômica e ambiental), fato esse observado por Freire e Cortez (2000) (Figura 10.17).

Na Tabela 10.10, mostram-se os teores de nutrientes nas vinhaças concentrada e in natura, obtidas na Usina Santa Elisa.

Quanto ao processo de evaporação, destaca-se que todo evaporador é composto por uma superfície de aquecimento, onde ocorre a transferência de calor do fluido de aquecimento (vapor) para o fluido de processo (vinhaça), e por um meio onde ocorre a separação do vapor condensado do fluido concentrado. O que difere nos diversos tipos de evaporadores é a forma

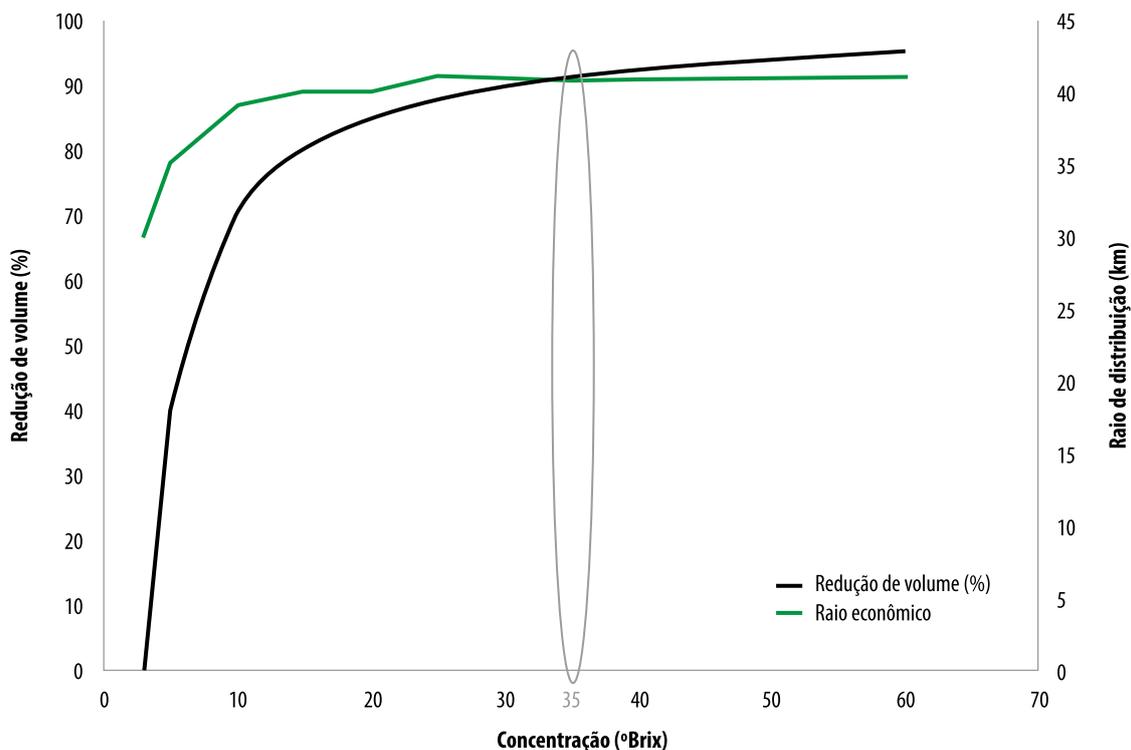


Figura 10.17. Raio econômico de aplicação da vinhaça x concentração x redução do volume.

Fonte: Germek e Feigl (1987) citado por Freire e Cortez (2000).

Tabela 10.10. Teores de nutrientes aplicados presentes nas vinhaças in natura e concentrada na Usina Santa Elisa.

Vinhaça	2004					
	K ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	MgO	M.O.	N total
	(kg m ⁻³)					
In natura	4,79	0,23	1,21	0,39	7,65	0,78
Concentrada	44,81	4,18	12,37	3,07	66,78	8,49
Vinhaça	2005					
	K ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	MgO	M.O.	N total
	(kg m ⁻³)					
In natura	4,60	0,18	0,72	0,81	–	0,46
Concentrada	40,72	1,85	6,26	10,59	–	85,83

Fonte: Gurgel (2009b).

como a separação entre o vapor vegetal e o fluido concentrado é feita (Franco, 2001).

Os evaporadores são grandes consumidores de energia. Em vista disso, são utilizadas várias estratégias para reduzir o consumo de energia, como o sistema de evaporação em múltiplos efeitos. Nesse arranjo, os evaporadores são montados em seqüência, de modo que o vapor ve-

getal de um evaporador (primeiro efeito) é utilizado para aquecer outro evaporador (segundo efeito) e assim sucessivamente. Na Figura 10.18, é apresentado o esquema ilustrativo de um evaporador de múltiplo efeito e, na Figura 10.19, o evaporador do tipo névoa turbulenta.

Conforme a Figura 10.18, o vapor evaporado no último efeito passa por um condensador, e o

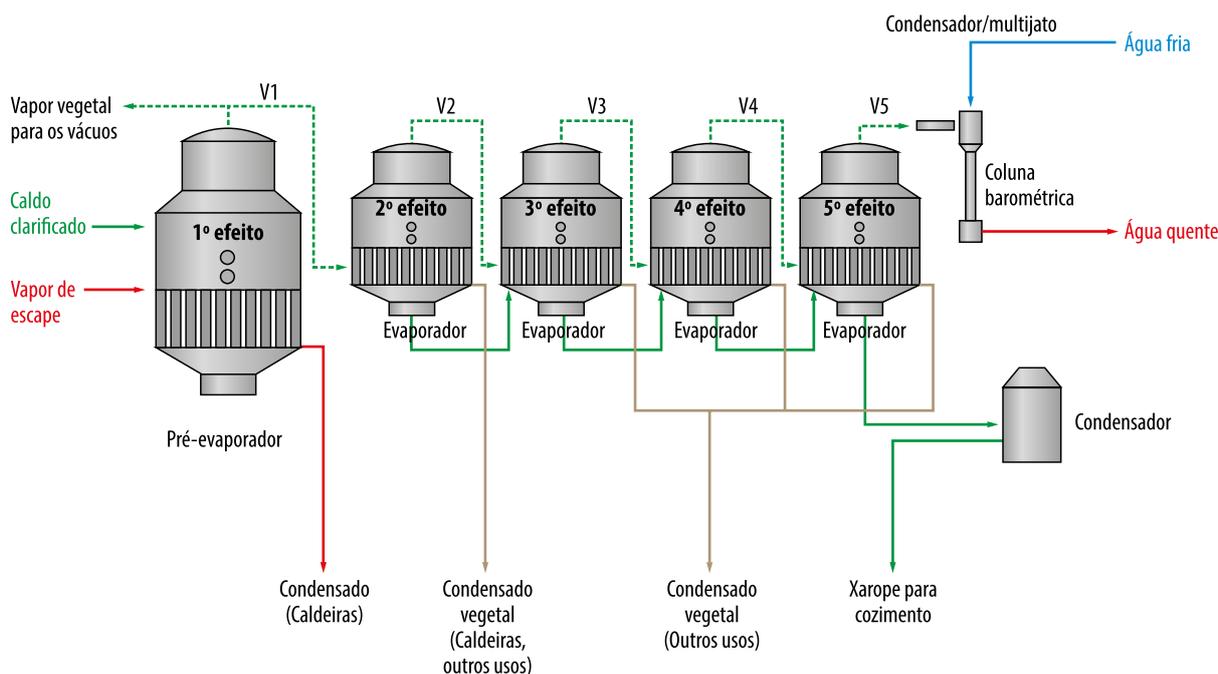


Figura 10.18. Esquema ilustrativo de um evaporador de múltiplo efeito.

Fonte: Adaptado de Elia Neto e Shintaku (2009).

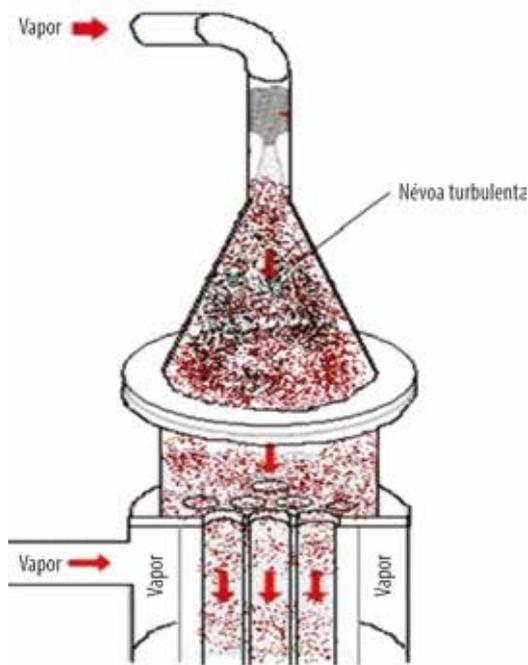


Figura 10.19. Evaporador do tipo névoa turbulenta.
Ilustração: Fernando Boscaroli.
Fonte: Boscaroli (2011).

processo é encerrado. Os vapores que saem do último corpo vão ao condensador. Esses vapores vêm acompanhados de gases não condensáveis e, como há necessidade de condensação intensa e de retirada deles, o condensador deve ser de grande potência a vácuo e dotado de dispositivos que permitam sua retirada. Em geral, utilizam-se condensadores barométricos nos quais a água é aspergida em grande quantidade sobre os vapores. Dividem-se em condensadores de contracorrente, de corrente paralela e injetores múltiplos ou multijatos (Assan, 2006).

Ressalta-se que quanto maior o número de efeitos, maior será a redução do consumo de energia. Esse arranjo permite utilizar somente o calor fornecido ao primeiro efeito (vapor de alimentação) para realizar todo o processo de evaporação. Além da economia de vapor, esse arranjo permite uma economia de água de resfriamento no condensador, já que este último é utilizado para condensar somente o vapor vegetal gerado no último efeito. Contudo, um maior número de efeitos ocasiona diferenças de

temperatura menores empregadas como força motriz em cada efeito, o que causa aumento na área de troca térmica necessária, bem como aumento dos custos fixos. Assim, a escolha do número de efeitos é definida a partir de um balanço econômico entre a economia de vapor e água de resfriamento e o custo do investimento.

Para concentrar a vinhaça de maneira eficiente, a tecnologia *thermally accelerated short time evaporation system* (Taste) tem como princípio de evaporação de água a névoa turbulenta descendente, com aceleração térmica, que consiste em explodir termicamente o líquido de entrada por meio de um *flash* parcial, resultando numa mistura de vapor e pequenas partículas líquidas (névoa). Essa névoa é gerada em cada um dos cones de distribuição que alimenta os tubos de cada um dos estágios do evaporador. O produto sob a forma de névoa cai livremente através dos tubos abertos, absorve o calor e causa a evaporação da água, aumentando mais ainda o seu volume. Ele é então acelerado termicamente, chegando a velocidades muito altas no final dos tubos, conforme ilustrado na Figura 10.19.

Os evaporadores de concentração de vinhaça possuem múltiplos efeitos a vácuo (até sete efeitos) (Gurgel, 2009b) e podem reduzir o volume desse resíduo em até seis vezes sem consumo adicional de vapor.

Nesse sistema, o vapor de aquecimento é admitido no primeiro efeito (vapor alcoólico proveniente da destilaria), enquanto os demais efeitos são aquecidos pelos vapores oriundos do efeito anterior. No último estágio de evaporação, o vapor é condensado em condensador barométrico de contato direto. Detalhes do processo de concentração de vinhaça com integração energética estão ilustrados nas Figuras 10.20, 10.21 e 10.22.

A vinhaça concentrada (até 65 °Brix) é o primeiro passo para a produção do Biofom (Gurgel, 2012).

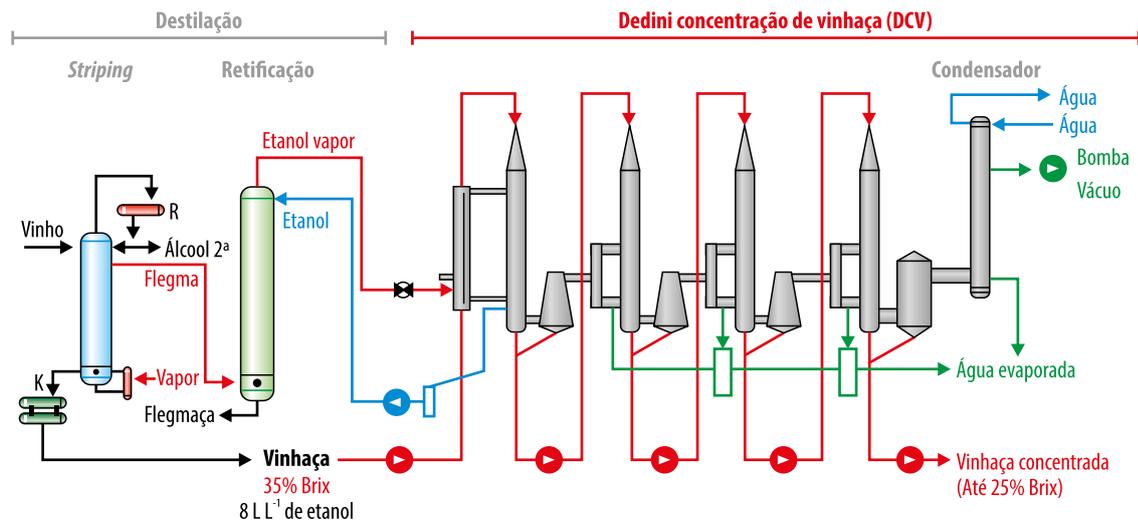


Figura 10.20. Concentração da vinhaça com integração energética com a destilaria.

Fonte: Gurgel (2009b).

Foto: Marclio Nogueira do Amaral Gurgel



Figura 10.21. Visão geral do concentrador de vinhaça com integração energética (Grupo Raízen – Unidade Costa Pinto, Piracicaba, SP).

Foto: Marclio Nogueira do Amaral Gurgel



Figura 10.22. Visão geral do concentrador de vinhaça com integração energética (Araraquara, SP).

A água recuperada da vinhaça pode ser reutilizada em diversas áreas da usina, como na embebição do sistema de extração do caldo, na diluição do fermento ou no preparo do mosto, contribuindo para a sustentabilidade do processo produtivo, visto que possibilita a redução da captação de água de mananciais.

O sistema é compacto, construído em aço inox 316, e de fácil instalação e limpeza, uma vez que o aquecimento e a evaporação rápida minimizam a ocorrência de incrustação. O equipamento possui sistema de limpeza *clean in place* (CIP), processo 100% automático que utiliza produtos químicos para eliminação de resíduos com alta eficiência térmica e baixo consumo de energia.

Esse processo de concentração de vinhaça também apresenta vantagens financeiras, uma vez que há redução significativa nos custos com transporte desse resíduo até a lavoura, seja esse por bombeamento seja por via transporte veicular.

Biofertilizante organomineral (granulado e farelado) – Biofom

Por meio da pesquisa, a agricultura está em constante processo de geração de novos conhecimentos, buscando elucidar as causas e os efeitos do uso de diferentes substâncias, a fim de obter maior eficiência na produção agrícola. O desenvolvimento e a produtividade das culturas são controlados, além dos fatores genéticos, ambientais e tratos culturais, por fatores fisiológicos e/ou hormonais. Além dos macros e micronutrientes, a utilização nas culturas agrícolas de biorreguladores, bioestimulantes ou bioativadores, também conhecidos no mercado como fertilizantes organominerais de última geração, tem se intensificado, com a obtenção de resultados importantes nas lavouras, o que gera a necessidade de se conhecer, com maior detalhe, o funcionamento desses compostos

químicos nas plantas. Os biofertilizantes são compostos bioativos², metabólitos, além de quelatos organominerais (Gurgel, 2012).

A mistura de dois ou mais reguladores vegetais com outras substâncias (aminoácidos, nutrientes e vitaminas) é chamada de bioestimulante (Castro; Vieira, 2003). A utilização dessas substâncias aumenta em importância, à medida que se aumenta o potencial genético das culturas e se eliminam fatores limitantes do clima e do solo, objetivando altos rendimentos e a melhoria da qualidade do produto colhido (Floss; Floss, 2007).

Durante o ciclo de desenvolvimento das culturas, dependendo de sua composição, concentração e proporção das substâncias, os biofertilizantes estimulam o crescimento vegetal por meio da maior divisão, alongação e diferenciação celular. Dessa forma, ocorre aumento da capacidade de absorção de nutrientes e água, e isso se reflete diretamente no desenvolvimento e na produtividade das culturas (Castro; Vieira, 2003).

Segundo Silva et al. (2007), biofertilizantes líquidos são produtos naturais obtidos da fermentação de materiais orgânicos com água, na presença ou ausência de ar (processos aeróbicos ou anaeróbicos). Podem possuir composição altamente complexa e variável, dependendo do material empregado, contendo quase todos os macro e microelementos necessários à nutrição vegetal.

Com base nessas definições, o Biofom (biofertilizante organomineral) caracteriza-se como um biofertilizante, uma vez que todos os seus componentes são de origem vegetal e seu principal elemento, a vinhaça, é produto da fermentação

² Resíduo final da fermentação de compostos orgânicos, contendo células vivas ou latentes de microrganismos (bactérias, leveduras, algas e fungos filamentosos).

do caldo da cana-de-açúcar, possuindo assim células vivas e microrganismos.

Na indústria sucroalcooleira, modificações nos sistemas de produção podem representar grandes otimizações no processo industrial. Por meio do reprocessamento de resíduos da cana-de-açúcar, obtém-se um produto sólido, granulado ou farelado, denominado Biofom, que pode ser formulado de acordo com as necessidades do solo e da cultura (Figura 10.23).

Foto: Marçílio Nogueira do Amaral Gurgel



Figura 10.23. Biofom granulado e farelado.

A produção de Biofom consiste, basicamente, na mistura de cinzas da caldeira, fuligens da chaminé, torta de filtro e vinhaça concentrada (Figura 10.23), os quais são enviados para a formulação do biofertilizante organomineral, que, posteriormente, são secos em um secador granulador do tipo tambor rotativo.

No estudo realizado por Gurgel (2012), que contemplou a caracterização e análise do potencial agrônomo da utilização do Biofom, em um testemunho envolvendo uma planta teste (milho), foram observadas diferenças entre os tratamentos (adubação com fertilizante mineral versus adubação com Biofom) até 45 dias após a semeadura. O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade de São Paulo, em Piracicaba, SP, em 2008. Observou-se que o Biofom pode substituir a utilização do fertilizante mineral e que alguns tratamentos apresentaram o mesmo desempenho do fertilizante mineral. O produto reduz a geração de resíduos da

agroindústria sucroalcooleira, aproveitando-os racionalmente, além de contemplar a legislação ambiental vigente.

No referido estudo, foram destacados tanto a redução nos custos com fertilizante mineral quanto a redução de custos com transporte, operações e infraestrutura, dada a eliminação da aplicação de vinhaça, torta de filtro e cinzas, separadamente, no campo. Além disso, o emprego do Biofom elimina o mau cheiro da vinhaça, podendo ser formulado de acordo com as necessidades específicas da cultura.

A matéria orgânica aplicada via Biofom promove a melhoria das propriedades físico-químicas do solo, da CTC e da porosidade, o que favorece a absorção de água, nutrientes e reduz perdas causadas por lixiviação.

O Biofom é uma solução sustentável. Além de estar de acordo com as legislações vigentes, traz benefícios ao ambiente, pois todos os resíduos produzidos no processamento da cana-de-açúcar podem ser transformados em biofertilizante, o que minimiza o risco de poluição de aquíferos e do solo pela lavagem dos resíduos (Gurgel, 2012).

Aproveitamento de resíduos de fontes exógenas na cultura de cana-de-açúcar

Em pesquisa sobre a dinâmica do nitrogênio amídico (^{15}N -ureia) e amoniacal (^{15}N -aquamônia) no solo, aplicado conjuntamente com o coproduto do ácido glutâmico (Ajifer), Pereira (2008) concluiu que associar fertilizantes líquidos com o Ajifer in natura na mistura com as fontes de nitrogênio amídico (ureia) ou amoniacal (aquamônia) é viável e apresenta estabilidade física e química. O autor conclui ainda que a formulação contendo Ajifer + ureia + KCl aplicada sobre a palhada da cana-de-açúcar apresentou

maior recuperação de N total, em razão da grande capacidade da palhada da cana-de-açúcar de reter o íon amônio (NH_4^+) de fonte amídica.

O Ajifer é um subproduto da fabricação do glutamato monossódico na empresa Ajinomoto. De acordo com a CPRN DAIA (São Paulo, 2008), tem-se a descrição técnica do processo de produção do glutamato monossódico pela Ajinomoto e a geração do Ajifer como um subproduto. Dada a importância dos aminoácidos como unidade fundamental que compõe uma proteína, e como as células animais não sintetizam todos os 20 aminoácidos necessários à síntese das diversas proteínas, buscam-se outras fontes para obter oito dessas substâncias, incluindo a lisina. A lisina é produzida pela transformação do açúcar dissolvido em lisina líquida e cristal através de fermentação por meio da adição de insumos (microrganismos) na matéria-prima. Inicialmente, o açúcar é armazenado para posterior dissolução quando são incorporados os microrganismos e a amônia para a efetiva fermentação. Após a fermentação, o caldo é acidificado com ácido sulfúrico.

O tratamento do caldo fermentado consiste na extração, através de resina de troca iônica, da lisina do restante do caldo, sendo esse posteriormente encaminhado para o processo de evaporação, no qual o concentrado residual é utilizado para produção do Ajifer (produto secundário). Por fim, a lisina concentrada é cristalizada via agitação mecânica sob temperaturas controladas e, após a separação da fase líquida e sólida por meio de centrífugas, o produto é enviado para secagem. A produção de treonina é semelhante à da lisina, mas a extração da treonina do caldo residual é realizada por meio de microfiltração por membranas. Outro diferencial na produção da treonina é a obtenção do subproduto Ajifer na etapa de separação, na qual os produtos nas fases líquida e sólida sofrem segregação (Dedini, 2009). Na produção

da Ajinomoto, são utilizados açúcar, amônia líquida (NH_3), ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 98%, ácido clorídrico (HCl) a 35%, ácido fosfórico (H_3PO_4) a 75% e soda cáustica (NaOH) a 50%. O processo industrial demanda utilização de vapor para as etapas de dissolução, concentração e secagem, entre outras (Gurgel, 2012).

Esterco de animais

A composição nutricional da adubação orgânica, em alguns casos, pode não ser balanceada devido à origem da matéria-prima empregada nesse tipo de adubação (Tabela 10.11), tornando necessária a complementação com fertilizantes minerais.

O maior empecilho para o emprego da adubação orgânica em grandes áreas é a falta de equipamentos adequados para a aplicação no campo, pois geralmente são materiais com alto teor de umidade, o que torna a atividade pouco eficiente, onerosa e demorada em relação à adubação mineral.

Dos adubos orgânicos, o esterco animal é considerado o mais importante, e seu principal nutriente é o N. Sua composição química possui outros elementos, como o P e o K. Apesar de ser bastante rico em nutrientes, pelo fato de a concentração dos elementos químicos presentes no adubo ser desbalanceada, o esterco animal deve ser aplicado e complementado por doses adicionais de fertilizantes minerais. A mistura de esterco com adubos fosfatados tem mostrado excelentes resultados, pois, além de ajudar a reter o P no solo, reduz as perdas de N.

Lodo de esgoto

O lodo de esgoto doméstico (LE), em vez do simples descarte em aterros sanitários ou incineração, como também outras aplicações como a conversão em óleo combustível, o reúso industrial e o tratamento no solo (*landfarming*)

Tabela 10.11. Composição química típica de vários materiais orgânicos de origem animal, vegetal e agroindustrial.

Material orgânico	Umidade	C:N	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Cd	Ni	Pb
	(g kg ⁻¹)													
Esterco bovino fresco	620	20	263	13	7	16	5	3	3	87	16	0	5	5
Esterco bovino curtido	340	21	485	23	18	32	30	9	3	329	38	0	3	2
Esterco de galinha	550	10	311	31	18	16	51	11	4	307	31	4	4	38
Esterco de porco	780	9	273	32	9	23	55	14	–	1.100	1.200	0	9	14
Composto de lixo	410	27	271	10	3	5	19	2	3	432	181	3	42	188
Lodo de esgoto (LE)	500	11	258	24	12	3	24	9	3	1.364	659	17	548	545
Composto com LE	335	12	197	16	1	1	4	1	1	942	290	2	32	83
Vinhaça in natura	950	17	200	12	2	60	20	8	10	60	100	–	–	–
Torta de filtro	770	27	348	13	9	3	22	3	13	87	57	–	–	–
Torta de mamona	90	10	495	49	8	12	20	5	–	141	80	–	–	–
Mucuna	870	20	462	23	5	23	15	3	–	46	23	–	–	–
Crotalaria juncea	860	25	500	20	3	21	14	3	–	14	7	–	–	–
Milho resteva	880	45	360	8	2	16	4	2	1	12	3	–	–	–
Aguapé	940	20	333	17	2	17	17	3	3	50	33	–	–	–

Fonte: Adaptado de Cantarella et al., (2022).

(Silva, 1995; Abreu Junior et al., 2005), pode ser aplicado na adubação de cana-de-açúcar, substituindo em 100% a adubação mineral nitrogenada (Franco et al., 2010). Essa aplicação traz muitos benefícios ambientais e ecológicos e pode aumentar a produtividade da cana com redução dos custos de produção.

A produção da cana-de-açúcar nos moldes atuais com o máximo aproveitamento dos resíduos e subprodutos gerados pode alcançar a sustentabilidade. Para isso os nutrientes envolvidos devem apresentar balanço nulo

ou positivo. As possíveis vias de exportação de nutrientes pela cana podem ser elencadas como aqueles presentes nos colmos, que são efetivamente o produto da colheita dessa cultura e variam entre 740 e 1.100 mg t⁻¹ de N; 27 e 62 mg t⁻¹ de P; 820 e 3.000 mg t⁻¹ de K; 89 e 213 mg t⁻¹ de Ca; 109 e 220 mg t⁻¹ de Mg; 116 e 359 mg t⁻¹ de S; 0,9 e 2,1 mg t⁻¹ de Zn; 0,5 e 0,9 mg t⁻¹ de Cu; 19 e 36 mg t⁻¹ de Fe; 8 e 21 mg t⁻¹ de Mn; e 9 e 35 mg t⁻¹ de Al (Orlando Filho, 1978; Primavesi et al., 1992). O LE pode compensar essas perdas.

O LE é um resíduo orgânico resultante do tratamento de águas residuárias nas estações de tratamento de esgotos (ETEs). Assim, a heterogeneidade de sua composição química é função das matérias-primas que o constituem (Silva et al., 2010). O LE proveniente de esgotos domésticos apresenta níveis de Cd, Cu, molibdênio (Mo), Ni, Zn e Pb, além de Mn, Fe, Al, Cr e mercúrio (Hg), entre outros menos frequentes, dentro dos teores permitidos para o uso agrônomo (Abreu Junior et al., 2005, 2008; Bettiol; Camargo, 2006).

A Resolução nº 375 do Conama (Brasil, 2006) determina a forma de condicionamento e utilização segura na agricultura. Sua utilização como fertilizante foi testada nas culturas de soja, milho, arroz, feijão, cana-de-açúcar e outras (Bettiol; Carvalho, 1982; Abreu Junior et al., 2005; Bettiol; Carmargo, 2006; Franco et al., 2010).

Em relação ao uso do LE, Chiba (2005) realizou um estudo no qual aplicou $8,2 \text{ t ha}^{-1}$ de LE (base seca) em cana-planta, juntamente com adubo fosfatado, e 16 t ha^{-1} de LE em cana-soca, em combinação com adubo nitrogenado. O autor verificou que o LE pode substituir até 25% do adubo fosfatado na cana-planta e 100% do adubo nitrogenado na cana-soca.

Em experimento utilizando o LE e fertilizantes minerais na cana-de-açúcar, Marques et al. (2007a) verificaram que a associação do LE com adubo mineral permitiu a economia de metade da adubação mineral recomendada, sem prejuízo à produtividade, à maioria das características químicas do solo e às características tecnológicas da cana-de-açúcar. Como o LE não fornece a quantidade adequada de K à cana-de-açúcar (Marques, 1990; Silva et al., 1996, 1998), uma fonte desse nutriente deve complementar seu uso (Abreu Junior et al., 2008). Para resolver essa questão, Franco (2003) observou que a combinação de LE, como fonte de N, com vinhaça, como fonte de K, foi tão eficiente quanto as

fontes minerais desses dois nutrientes (ureia e KCl) na produtividade e qualidade industrial da cana-planta na variedade SP81-3250.

Tasso Junior et al. (2007) verificaram os melhores resultados em produtividade quando se empregou LE complementado com KCL ($106,6 \text{ t ha}^{-1}$) no segundo corte (primeira cana-soca). Para o terceiro e quarto cortes, Camilotti et al. (2006) não encontraram diferenças na produtividade da cana-de-açúcar adubada com LE + KCL e vinhaça + ureia. Para finalizar, Nogueira et al. (2007) concluíram que, no quinto corte, o LE ou a vinhaça complementada apresentaram desempenhos comparáveis à fertilização mineral.

Em relação às características tecnológicas, Marques (1990), Marques et al. (1994) e Silva et al. (1996, 1998) não verificaram efeito do LE na pureza do caldo, ainda que pequenas diminuições no valor do Brix e da Pol³ possam ter ocorrido.

O potencial poluidor ambiental do LE é fator de restrição na sua utilização agrícola, especialmente por parte dos agricultores, e objeto de preocupação pelos agentes de controle ambiental (Abreu Junior et al., 2005, 2008; Bettiol; Camargo, 2006).

O estudo de doses de LE, variando de 0, 10, 20 e 40 t ha^{-1} (base seca), foi conduzido por Marques et al. (2007b), que observaram aumento nas concentrações de Cr, Ni, Pb e Zn no solo (na linha de plantio e nas entrelinhas), sendo a dose de 40 t ha^{-1} a que promoveu as maiores concentrações de metais-traços. Porém, mesmo na maior dose, os valores encontrados estão abaixo das concentrações máximas permitidas de metais-traços nos solos tratados com LE (Cetesb, 2006). Esse aumento das concentrações no solo não se refletiu nas partes aéreas das plan-

³ Pol é a porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada de peso normal determinada pelo desvio provocado pela solução no plano de vibração da luz polarizada.

tas, mas aparece acumulado nas raízes (Silva et al., 2000). Esse fato é corroborado por Camilotti et al. (2007), que verificaram que doses de LE, após três aplicações anuais sucessivas, não apresentaram potencial de contaminação do sistema solo-cana.

Estudo realizado por Silva et al. (2010) avaliou os efeitos da aplicação do LE no solo, com e sem complementação com adubo mineral NPK. Os autores concluíram que o LE atuou como fertilizante e corretivo de acidez para a cultura de cana-de-açúcar, principalmente como fonte de Ca, P, S e Zn, propiciando melhor perfilhamento e aumento da produtividade agrícola. A produtividade da cana-de-açúcar foi relacionada positivamente com a atividade da fosfatase ácida, refletindo no equilíbrio energético da cana-planta. Além do teor de P no solo, a atividade da fosfatase foi influenciada também pela ação secundária conjunta dos metais Cu, Zn e boro (B).

Franco et al. (2010) aplicaram quatro doses de LE (0, 3,6, 7,2 e 10 t ha⁻¹, base seca), de N (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N, via ureia) e de P (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, via superfosfato triplo) em cana-planta e verificaram que a produtividade de colmos (tonelada de cana por hectare – TCH) aumentou em função das doses de LE, de P e de N. Ainda, com a aplicação isolada de LE, a produtividade passou de 54,14 t ha⁻¹, no tratamento controle, para 105,91 t ha⁻¹, quando 10,8 t ha⁻¹ de LE foi aplicado. A produtividade máxima foi alcançada com a aplicação de 10,8 t ha⁻¹ de LE combinado com 115 kg ha⁻¹ de P₂O₅, via fertilizante fosfatado; nesse caso, o LE propiciou uma redução no uso de adubo fosfatado em relação à dose normalmente recomendada para esse nível de produção. Na cana-soca, os autores avaliaram o efeito residual da aplicação do LE na cana-planta, após adubação N-P-K em área total, e verificaram que a produtividade foi função exclusiva das doses de LE.

Em ensaio conduzido por Franco et al. (2010), os autores verificaram que a maturação e a qualidade tecnológica da cana não foram prejudicadas, medida pelo Brix, Pol (sacarose aparente), pureza, açúcares redutores e açúcares redutores totais na matéria-prima, tanto na cana-planta quanto na cana-soca, sendo o LE aplicado em função da demanda de N. A pesquisa determinou ainda a presença de elementos potencialmente tóxicos em todo o sistema solo-cana, incluindo no caldo da cana, que foi submetido à digestão ácida em sistema de micro-ondas e analisado pelas técnicas de ativação neutrônica (INAA) e de espectrometria de massa com plasma (ICP-MS), que apresentaram as seguintes concentrações médias, em µg kg⁻¹: Ag = 0,2–0,3; As = 1,0–3,3; B = 31–60; Be = 0,4–2,4; Cd = 1,7–14,1; Co = 5,6–16,0; Cr = 12,8–25,4; Cu = 377–610; Eu = 0,3–2,7; Hg = 0,2–4,3; La = 0,5–1,3; Mo = 1,0–4,7; Ni = 26–56; Pb = 18,6–39,5; Sb = 0,3–0,9; Sc = 0,5–1,3; Se = 0,38–0,17; Sm = 0,2–9,4; Th = 0,5–1,4; Tl = 1,9–6,8; V = 4,4–9,3; e, em mg kg⁻¹: Al = 1,9–4,2; Ba = 0,6–1,4; Ca = 86–205; Fe = 5,1–8,0; K = 822–2.239; Mg = 193–316; Mn = 7,6–14; Na = 0,3–1,2; P = 58–165; r = 0,7–2,0; Zn = 1,7–4,3 (Abreu Junior et al., 2008). Com exceção de Co, Mo, selênio (Se) e, principalmente, Cd e Zn, cujas concentrações foram maiores com a aplicação do LE, a concentração dos elementos no caldo não foi modificada pela adição do LE, quando comparada com a fertilização mineral, sendo consideradas normais (Nogueira et al., 2013).

Composto de lixo

A adição de composto de lixo (CL) ao solo aumenta a atividade e a biomassa microbiana e altera a dinâmica dos nutrientes (Abreu Junior et al., 2002). A aplicação de CL no solo aumenta a disponibilidade de matéria orgânica (MO), N, P, K, Ca, Mg e S, eleva o pH e a CTC e reduz a

acidez total ($H^+ + Al^{3+}$) (Mazur et al., 1983; Abreu Junior et al., 2000, 2002; Oliveira et al., 2002a).

Em ensaio com o uso de CL em cana-de-açúcar em campo, num Argissolo-Vermelho eutrófico, com doses de 0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de CL combinadas com 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, comparadas com a aplicação de 600 kg ha⁻¹ da fórmula 4-20-20, ou seja, 24 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, Silva et al. (1996, 1998) verificaram aumento da fertilidade do solo em função do CL, com aumentos lineares de P e K no solo e no caldo da cana. A aplicação do CL aumentou a produtividade de colmos também de modo linear em 70, 78, 98 e 103 t ha⁻¹, respectivamente em relação às doses utilizadas; embora o tratamento NPK tenha produzido 121 t ha⁻¹. Verificaram ainda que não houve atraso na maturação da cana-de-açúcar pela aplicação do composto, entretanto a combinação do composto com P e/ou K proporcionou melhor acúmulo de açúcar nos colmos.

Oliveira (2000) avaliou doses de 0, 20, 40 e 60 t ha⁻¹ de CL (composto de lixo em base úmida) na cana-planta. Foi observado uma produtivi-

dade crescente da cana de acordo com as doses de CL aplicadas, variando de 35 a 64 t ha⁻¹, chegando a superar o resultado de 54 t ha⁻¹ apresentado pela adubação NPK mineral. No entanto, os resultados de produtividade foram baixos em virtude da baixa disponibilidade de chuva naquele ano agrícola. Já durante o ciclo da cana-soca, tratada com 0, 24, 48 e 72 t ha⁻¹ de CL (t ha⁻¹ de composto em base úmida), o clima apresentou boa distribuição de chuvas. Nesse cenário, não houve diferença entre as doses de de CL e a adubação com NPK mineral. A produtividade foi da ordem de 140 t ha⁻¹ contra 100 t ha⁻¹ no tratamento controle.

Na cana-de-açúcar, a aplicação de CL deve ser feita em uma só dose, em área total ou no sulco de plantio, respeitando as recomendações resultantes da análise de solo e os teores de N, P e K de CL, como são mostrados nas Tabelas 10.12 e 10.13 (Silva et al., 2002b). Outra possibilidade é calcular a dose de CL apenas pela demanda de N pela cultura da cana (90 kg ha⁻¹ de N) (Raj et al., 1997), com base na quantidade de N adicionada pelo composto, considerando-se uma eficiência de aproveitamento de 40 a 50% do nutriente,

Tabela 10.12. Recomendação de uso de composto de lixo urbano na cultura de cana-de-açúcar⁽¹⁾, com base na interpretação dos teores de fósforo (P) e de potássio (K) obtidos pela análise química de solo e na composição do composto de lixo para o estado de São Paulo.

Composição do composto de lixo		P resina (mg dm ⁻³)				K ⁺ trocável (mmol _e dm ⁻³)		
		0-6	7-15	16-40	> 40	0-1,5	1,6-3,0	> 3,0
Nutriente	(%)	Dose de composto (t ha ⁻¹)						
P	> 0,6	15	10 ^(*)	5 ^(*)	-	-	-	-
	0,2 a 0,6	30	20	15	10 ^(*)	-	-	-
	< 0,2	50	35	25	10 ^(*)	-	-	-
K	> 1,2	-	-	-	-	15	10 ^(*)	5 ^(*)
	0,4 a 1,2	-	-	-	-	20	15	10 ^(*)
	< 0,4	-	-	-	-	50	30	20

^(*) Para doses de composto de 10 t ha⁻¹ ou menos, o efeito do composto se deve mais ao fornecimento de matéria orgânica e não mais ao suprimento de P e K.

⁽¹⁾ Produtividade esperada de 80 a 120 t ha⁻¹.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2002b).

Tabela 10.13. Recomendação de adubação para cana-de-açúcar com base no teor de nitrogênio do composto de lixo.

Teor de nitrogênio no composto de lixo (%)	Dose de composto (t ha ⁻¹)
> 3,5	20
1,8 a 3,5	30
< 1,8	45

Fonte: Silva et al. (2002b).

ou seja, o teor de N-total do composto multiplicado pelo fator de 0,4 a 0,5.

Silva et al. (2002b) afirmam que, para a cana-soca, é o P que deve apresentar maior resposta ao CL, enquanto a menor resposta deve-se ao K contido no material. A aplicação de CL normalmente é de 60 t ha⁻¹ quando aplicado sem suplementação de P ou 30 t ha⁻¹ com adição da metade da dose de P recomendada para a cultura da cana.

Existem observações que mostram que o CL incrementou a produtividade da cana mesmo em área já adubada com NPK mineral, já que promove a retenção de água, em função da matéria orgânica adicionada ao solo e dos micronutrientes presentes (Kiehl, 1985).

O uso de CL no solo preocupa pela alta mobilidade do nitrato, uma vez que doses elevadas desse íon podem causar eutrofização de águas superficiais (lagos, rios e nascentes) e ainda contaminação de águas subterrâneas (Abreu Junior et al., 2008).

O trabalho de Oliveira (2000), que aplicou em área total as doses de 20, 40 e 60 t ha⁻¹ de composto, base seca, na cana-de-açúcar, corrobora essa preocupação, pois verificou aumento na concentração de N-NO⁻³ na solução do solo a 0,3, 0,6 e 0,9 m de profundidade. Nas doses de 40 e 60 t ha⁻¹ de CL, o teor do nitrato na profundidade de 0,9 m apresentou concentrações de 10,51 a 20,93 mg L⁻¹ e 24,31 a 46,25 mg L⁻¹,

respectivamente, acima do limite máximo considerado para potabilidade da água, que é estabelecido pela Organização Mundial de Saúde (10 mg L⁻¹). Por sua vez, doses anuais de até 24 t ha⁻¹ de CL não ofereceram riscos de contaminação de aquíferos. Portanto, os riscos de contaminação de aquíferos por N-NO⁻³ devem ser considerados no planejamento de aplicações de CL em áreas agrícolas, sendo essencial o monitoramento do solo e de sua solução em profundidade para evitar riscos à qualidade das águas subterrâneas.

Em outro experimento, Oliveira et al. (2002b) avaliaram aplicações sucessivas de CL sobre a movimentação, em profundidade, dos metais Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em um Latossolo Amarelo distrófico. Como resultado, não observaram evidências de movimentação dos metais ao longo do perfil do solo, exceto para o Zn, que apresentou mobilidade no solo, e verificaram que, ao final do ciclo da cana-soca, houve aumentos significativos desse elemento químico até a camada de 0,4 m a 0,6 m de profundidade.

Rossetto et al. (2002) utilizaram doses de 0, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ (base seca), com quatro doses de N (0, 25, 50 e 75 kg ha⁻¹) e quatro doses de superfosfato triplo (0, 28, 56 e 112 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Os resultados apontaram que o nitrogênio isoladamente não teve efeito na produtividade, mas as doses de composto e de superfosfato tiveram efeitos linear e quadráticos, respectivamente, sobre a produtividade. Por meio de modelo matemático, os autores estimaram que a produtividade máxima foi obtida com a aplicação de 35 t ha⁻¹ do composto, combinado com 56 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

Silva et al. (2002a) estudaram o efeito complementar do CL na adubação NPK mineral com 500 kg ha⁻¹ de 4-20-20 (24 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente), em que foram aplicados 30 t ha⁻¹ de CL suprimindo a metade do P requerido pela

cultura, na produção da cana-planta, variedade RB72454. As doses de CL testadas corresponderam a 10, 20, 30, 40 e 50 t ha⁻¹. Os autores não verificaram alteração na maturação da cana-de-açúcar até a dose de 30 t ha⁻¹ de CL e observaram que a produtividade de colmos aumentou linearmente com as doses de CL de até 50 t ha⁻¹. O melhor resultado foi a aplicação do adubo NPK + 50 t ha⁻¹ do composto, o que refletiu na maior produtividade de açúcar por hectare.

Considerações finais

São inúmeros os produtos e subprodutos gerados na agroindústria da cana-de-açúcar, dados robustos mostram forte tendência de maior utilização dos subprodutos com efeitos na sustentabilidade ambiental e da cultura, bem como na redução dos custos de produção. Além disso, são enormes os desafios e a demanda por novos usos para os subprodutos da cana que poderão atender a própria cultura e outras também.

A utilização de resíduos e efluentes em solo cultivado com cana-de-açúcar deve ser conduzida não somente para eliminar a sua nocividade, mas também para tornar atraente o seu uso, isto é, agregar valor ao produto, quer como fonte de nutrientes para a cultura quer como condicionador do solo.

De modo geral, a aplicação de resíduos e efluentes no solo abre perspectivas de estudos bastante amplos, especialmente em relação a subprodutos externos à agroindústria canavieira e sua utilização em condições tropicais.

Referências

- ABREU JUNIOR, C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. de C. Uso agrícola de resíduos orgânicos: propriedades químicas do solo e produção vegetal. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P. da; CARDOSO, E. J. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 4, p. 391-470.
- ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F.; ALVAREZ V., F. C. Condutividade elétrica, reação do solo e acidez potencial em solos adubados com composto lixo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 635-647, set. 2000. DOI: [10.1590/S0100-06832000000300016](https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000300016).
- ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, F. C. Carbono orgânico, nitrogênio, fósforo e enxofre em solos tratados com composto de lixo urbano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 769-780, set. 2002. DOI: [10.1590/S0100-06832002000300022](https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300022).
- ABREU JUNIOR, C. H.; NOGUEIRA, T. A. R.; OLIVEIRA, F. C.; PIRES, A. M. M.; FRANCO, A. Aproveitamento agrícola de resíduos no canavial. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; NOGUEIRA, T. A. R.; TASSO JÚNIOR, L. C.; BERNARDI, J. H. (ed.). **Tecnologias na agroindústria canavieira**. Jaboticabal: FCAV, 2008. p. 184-210.
- ALBERS, M. Concentração de vinhaça: tecnologias, equipamentos, e sua integração energética numa destilaria. **Anais...** Jaboticabal: Ed. da Unesp, 2007.
- ALBUQUERQUE, G. A. C.; MARINHO, M. L. Influência da torta de filtro sobre a adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, v. 93, n. 1, p. 38-43, 1979.
- ALMEIDA, J. R. de. **O problema da vinhaça em São Paulo**. Piracicaba: Instituto Zimotécnico, 1953. 24 p. (Instituto Zimotécnico, 3).
- ALMEIDA, J. R. de; RANZANI, G.; VALSECHI, O. **A vinhaça na agricultura**. Piracicaba: Instituto Zimotécnico, 1950. 21 p. (Instituto Zimotécnico, 1).
- ALMEIDA, M. de. (coord.). **Vinhaça: principais técnicas de utilização**. **Piracicaba Engenharia Sucoalcooleira**, 22 nov. 2015. Disponível em: <http://piracicabaengenharia.com.br/vinhaca-principais-tecnicas-de-utilizacao>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- ALVES, P. R. L. **Avaliação ecotoxicológica da vinhaça de cana-de-açúcar no solo**. 2015. 138 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X.; LEAL, J. R.; ROSSIELLO, R. O. P. Desnitrificação e imobilização de nitrogênio em solo tratado com vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 263-268, 1983.
- ARRIGONI, M. B.; SILVEIRA, A. C.; FURLAN, L. R.; PARRÉ, C.; COSTA, C.; CURI, P.R. Avaliação de vinhaça líquida em substituição a água em terminação de bovinos em confinamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n.3, p. 1333-1340, 1993.
- ASSAN, M. A. C. **Avaliação do desempenho de um reator biológico de discos rotativos (biodisco) no tratamento de efluentes da indústria sucoalcooleira**. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia

Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos: classificação. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

AZEREDO, D. F.; ROBAINA, A. A.; LAVORENTI, N. A. Correlação ente algumas características de solo e resposta da cana soca à aplicação de vinhaça. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 3., 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Stab, 1984. p. 36-39.

BARBOSA, V. Novas tecnologias no uso da vinhaça e aspectos legais. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; AZANIA, A. A. de P. M.; TASSO JUNIOR, L. C.; NOGUEIRA, G. de A.; VALE, D. W. do (org.). **Tópicos em tecnologia sucroalcooleira**. Jaboticabal: Multipress, 2006. p. 141-150.

BARBOSA, V.; DURIGAN, A. M. P. R.; GLÓRIA, N. A. da; MUTTON, M. A. Uso de vinhaça 18 concentrada na adubação de soqueira de cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 24, n. 6, p. 26-31, jul./ago. 2006.

BARROS, R. P.; ALMEIDA, P. R. V.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M. L. B.; VIÉGAS, R. A.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, p. 341-346, 2010.

BEBÉ, F. V.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, G. B.; OLIVEIRA, V. S. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 781-787, 2009.

BERTONCINI, E. I. Geração de resíduos da indústria da cana-de-açúcar. In: WORKSHOP ASPECTOS AMBIENTAIS DA CADEIA DO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR, 4., 2007, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2007. 1 CD-ROM.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto**: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349 p.

BETTIOL, W.; CARVALHO, P. C. T. Utilização de lodo de esgoto primário e fertilizantes organo-mineral IPT na cultura de milho. **Fertilizantes**, v. 4, n. 1, p. 14-5, 1982.

BIASE, L. P. de. Aspectos gerais da concentração das vinhaças. In: WORKSHOP DE GESTÃO DE ENERGIA E RESÍDUOS NA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA, 2., 2007, Pirassununga. **Anais...** Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, 2007.

BOLSANELLO, J.; VIEIRA, J. R. Caracterização da composição química dos diferentes tipos de vinhaça da

região de Campos-RJ. **Brasil Açucareiro**, v. 96, n. 5, p. 45-59, 1980.

BOSCARIOL, F. C. **Dedini concentração de vinhaça**: vaporização tipo névoa turbulenta. Disponível em: www.dedini.com.br. Acesso em: 10 maio 2011.

BOTELHO, R. G. **Avaliação da qualidade da água do rio Piracicaba (SP) e efeito da vinhaça para os organismos aquáticos antes e após a correção do pH**. 2013. Tese (Doutorado em Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba. DOI: 10.11606/T.64.2013.tde-24092013-161649. Acesso em: 24 mar. 2023.

BRASIL SOBRINHO, M. de O. C. do. **Estudos sobre o aproveitamento da torta de filtro de usina de açúcar como fertilizante**. 1958. 109 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 30 ago. 2006.

BRAUNBECK, O. A.; CORTEZ, L. A. B. O cultivo da cana-de-açúcar e o uso dos resíduos. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (org.). **Uso de biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: Ed. da Unicamp, 2005. p. 215-246.

BUZOLIN, P. R. S. **Efeitos da palha residual da colheita mecanizada, associada a fontes de potássio e doses de nitrogênio, no solo e nas socas de cana-de-açúcar**. 1997. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal.

CAMARGO, O. A. de; BERTON, R. S.; GERALDI, R. N.; VALADARES, J. M. A. da S. Alterações de características químicas de um Latossolo Roxo distrófico incubado com resíduos da indústria álcool açucareira. **Bragantia**, v. 43, n. 1, p. 125-139, 1984. DOI: [10.1590/S0006-87051984000100011](https://doi.org/10.1590/S0006-87051984000100011).

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M. O.; SILVA, A. R. da; TASSO JUNIOR, L. C.; NOBILE, F. O. de; NOGUEIRA, G. de A.; PRATI, F. Produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar cultivada com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 24, n. 3, p. 32-35, jan./fev. 2006.

CAMILOTTI, F.; MARQUES, M. O.; ANDRIOLI, I.; SILVA, A. R. da; TASSO JUNIOR, L. C.; NOBILE, F. O. de. Acúmulo de metais pesados em cana-de-açúcar mediante a aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia**

Agrícola, v. 27, n. 1, p. 284-293, 2007. DOI: [10.1590/S0100-69162007000100023](https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100023).

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATOS JR., D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 3. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. 489 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

CASTRO, L. J. P. de; GODOY, O. P. Uso da torta de filtro no sulco de plantio da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). **Brasil Açucareiro**, v. 94B, n. 5, p. 66-76, nov. 1979.

CASTRO, P. R. C.; VIEIRA, E. L. Biorreguladores e bioestimulantes na cultura do milho. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. (ed.). **Milho: estratégias para alta produtividade**. Piracicaba: Esalq/USP, 2003. p. 99-115.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Biomass power generation: sugarcane bagasse and trash**. Disponível em: <http://www.ctcanavieira.com.br>. Acesso em: 15 ago. 2022.

CETESB. **Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo, 2006. 12 p. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/wp-content/uploads/sites/21/2013/12/P4_231.pdf. Acesso em: 6 jan. 2022.

CHIBA, M. K. **Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo: parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura**. 2005. 142 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

CÓ JÚNIOR, C.; MARQUES, M. O.; TASSO JÚNIOR, L. C. Efeito residual de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 1, p. 196-203, 2008. DOI: [10.1590/S0100-69162008000100020](https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000100020).

COLETTI, J. T.; BITTENCOURT, V. C.; GIACOMINI, G. M. Torta de filtro rotativo em combinação com diferentes formas de fósforo, com vistas à substituição da torta de mamona e de fosfatos solúveis em água, na fertilização da cana planta. **Brasil Açucareiro**, v. 96, p. 16-27, 1980.

COLETTI, J. T.; DEMATTÊ, J. L. I.; GASPARINI, C. T.; LORENZETTI, J. M. Efeito da aplicação de vinhaça nas propriedades químicas dos solos da usina São José, Macatuba/SP. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 2., 1981. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Stab, 1981. p. 153-164.

COPERSUCAR (São Paulo). **Aproveitamento da vinhaça: viabilidade técnica econômica**. São Paulo, 1979. 66 p.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FARBAIM, E. de M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar

para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009. DOI: [10.1590/S0100-40422009000100016](https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100016).

CORTEZ, L. A. B.; BRITO CRUZ, C. H. de; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H.; SLUYS, M. van; MACIEL FILHO, R. (org.). **Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. São Paulo: Blucher, 2016. 224 p.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPP, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v. 2, n. 2, p. 1-17, 1992.

DEDINI. Processo para produção de fertilizante ogônio-mineral. Int. C05F5/00, C05G1/00. BR n. PI0801794-8. **Revista da Propriedade Industrial**, n. 2485, p. 837/950, ago. 2018.

DEDINI. **Relatório interno**. Piracicaba, 2009. 60 p.

ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A. Usos e reusos de água e geração de efluentes. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroalcooleira**. Brasília, DF: ANA, 2009. p. 69-180.

EMPRESA PERNAMBUCANA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Comissão Estadual de Fertilidade do Solo. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação**, Recife, 1998. 198 p.

FLOSS, E. L.; FLOSS, L. G. Fertilizantes organominerais de última geração: funções fisiológicas e uso na agricultura. **Revista Plantio Direto**, v. 16, n. 100, p. 26-29, 2007.

FRANCO, A. **Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto e vinhaça: nitrogênio no sistema solo-planta, produtividade e características tecnológicas**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

FRANCO, A.; ABREU JUNIOR, C. H.; PERECIN, D.; OLIVEIRA, F. C.; GRANJA, A. C. R.; BRAGA, V. S. Sewage sludge as nitrogen and phosphorus source for cane-plant and first ratoon crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 553-561, 2010. DOI: [10.1590/S0100-06832010000200029](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200029).

FRANCO, M. **Integração energética de sistemas de evaporação localizados abaixo do ponto pinch**. 2001. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p. (Série engenharia agrícola).

FREITAS, S. S.; CARDOSO, C. O. N.; CAMARGO, O. A.; LOPES, E. S. Mineralização e imobilização de nitrogênio em solo

- tratado com torta de filtro e carbonato de cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, p. 243-248, 1988.
- GLÓRIA, N. A. **Emprego da vinhaça para fertilização**. Piracicaba: Codistil, 1976. 31 p.
- GLÓRIA, N. A.; MAGRO, J. A. Utilização agrícola de resíduos da usina de açúcar e destilaria na Usina da Pedra. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DA AGROINDÚSTRIA AÇUCAREIRA, 4., Águas de Lindóia. **Anais...** São Paulo: Copersucar, 1977. p. 163-180.
- GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **Álcool e Açúcar**, v. 4, n. 15, p. 22-31, 1984.
- GLÓRIA, N. A.; SANTA ANA, A. G.; BIAGI, E. Composição dos resíduos de usina de açúcar e destilados. **Brasil Açucareiro**. v. 81, n. 6, p. 78-87. 1973.
- GORNI, M.; BERTO, D. A.; MOURA, M. P. de; CAMARGO, J. C. de M. Utilização da vinhaça concentrada na alimentação de suínos em crescimento e terminação. **Boletim de Indústria Animal**, v. 44, n. 2, p. 271-279, 1987.
- GURGEL, M. N. A. A Usina Dedini para produção de BIOFOM - biofertilizante organomineral. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL E MOSTRA DE TECNOLOGIA DA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA, 2009. Piracicaba. [Anais...]. Piracicaba: Simtec, 2009a.
- GURGEL, M. N. A. **Relatório interno da Divisão de Engenharia de Tecnologias**. Piracicaba: Dedini, 2009b.
- GURGEL, M. N. A. **Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado**. 2012. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- HIDALGO, K.; RODRÍGUEZ, B.; LÓPEZ, M.; IBEN, C.; ALBELO, A.; CÁRDENAS, M. **Vinhaça de destilaria como aditivo alternativo na alimentação de aves**. 2011. Disponível em: <https://pt.engormix.com/avicultura/artigos/vinhaça-alimentacao-aves-t37289.htm>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Agrônômica Ceres, 1985. 492 p.
- LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O.; SCHIAVINATO JÚNIOR, P.; BOARETTO, A. E. Perdas gasosas de nitrogênio de vinhaça e ureia em solos cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, n. 3, p. 463-469, 1994.
- LEAL, J. R.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X.; ROSSIELLO, R. O. P. Potencial redox e pH: variações em um solo tratado com vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, n. 3, p. 257-261, 1983.
- MARQUES, M. O. **Efeitos da aplicação de lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar**. 1990. 164 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MARQUES, M. O.; BELLINGIERI, P. A.; MARQUES, T. A.; NOGUEIRA, T. A. R. Qualidade e produtividade da cana-de-açúcar cultivada em solo com doses crescentes de lodo de esgoto. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 2, p. 111-122, Apr./June 2007a.
- MARQUES, M. O.; BELLINGIERI, P. A.; MELO, W. J.; OLIVEIRA, F. C.; FREITAS, J. C.; SANTIAGO, G. Avaliação agroindustrial de cana-de-açúcar cultivada em solo acrescido de lodo de esgoto. In: REUNIÃO BRASILEIRA E FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21., 1994, Petrolina. **Anais...** Petrolina: Embrapa-Cpatsa: SBCS, 1994. p. 335-336.
- MARQUES, M. O.; NOGUEIRA, T. A. R.; FONSECA, I. M.; MARQUES, T. A. Teores de Cr, Ni, Pb e Zn em Argissolo Vermelho tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n. 1, p. 133-143, 2007b.
- MARTINS, M. de E. **Atributos de um latossolo sob aplicação de vinhaça e cultivo de cana-de-açúcar**. 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Cuiabá.
- MATTIAZZO, M. E.; GLÓRIA, M. A. Efeito da vinhaça na acidez do solo. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 4, n. 2, p. 35-40, 1985.
- MAZUR, N.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A. Efeito do composto de resíduo urbano no pH e alumínio trocável em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 157-159, 1983.
- MEDEIROS, A. P. Composição química dos diferentes tipos de vinhaça nos Estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Saccharum**, v. 4, n. 12, p. 36-40, 1981.
- MINHONI, M. T. A.; CERRI, C. C. Decomposição de vinhaça em solo sob diferentes níveis de umidade: Liberação de CO₂, formação de biomassa microbiana e imobilização do nitrogênio adicionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, n. 1, p. 25-30, 1987.
- MINHONI, M. T. A.; EIRA, A. F.; CARDOSO, E. J. B. N. Efeitos da adição de N e P sobre a decomposição de diferentes tipos de material orgânico no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 297-304, 1990.
- MIRANDA, T. L.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, E. F. F.; ROLIM, M. M. Alterações físicas e biológicas em solo cultivado com cana-de-açúcar após colheita e aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 1, p. 150-158, 2012.

- NARDIN, R. R. **Torta de filtro aplicada em argissolo e seus efeitos agrônômicos em duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em duas épocas.** 2007. 39 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas.
- NEVES, M. C. P.; LIMA, I. T.; DÖBEREINER, J. Efeito da vinhaça sobre a microflora do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 131-136, 1983.
- NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v. 114, n. 15, p. 168-177, 2013. DOI: [10.1016/j.jenvman.2012.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.09.012).
- NOGUEIRA, T. A. R.; MARQUES, M. O.; FONSECA, I. M.; MENDONÇA, L. Q. H. de. Nutrientes em cana-de-açúcar de 5º corte cultivada em solo tratado com lodo de esgoto e vinhaça por quatro anos consecutivos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n. 2, p. 7-19, 2007.
- 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, n. 2, p. 171-176, 20 mar. 1981.
- OBSERVATÓRIO da cana. 2020. Disponível em: <https://observatoriodacana.com.br/#>. Acesso em: 21 fev. 2022.
- OLIVEIRA, F. C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num latossolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar.** 2000. 246 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ABREU JUNIOR, C. H. Alterações em atributos químicos de um Latossolo pela aplicação de composto de lixo urbano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 4, p. 529-538, 2002a. DOI: [10.1590/S0100-204X2002000400015](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000400015).
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ABREU JUNIOR, C. H. Movimentação de metais pesados em Latossolo adubado com composto de lixo urbano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1787-1793, 2002b. DOI: [10.1590/S0100-204X2002001200016](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001200016).
- OLIVEIRA, M. de. Mais que sustentável. **Revista Pesquisa Fapesp**, edição 151, set. 2008. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/mais-que-sustentavel>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- OLIVÉRIO, J. L.; BOSCARIOL, F. C. Expansion of the Sucrenergy industry and the New Greenfield Projects in Brazil from the view of the equipment industry”. **Proceedings of XXVIII ISSCT – International Society of Sugar Cane Technologists Congress**, São Paulo, 24 a 27 de junho de 2013.
- OLIVÉRIO, J. L.; BOSCARIOL, F. C.; MANTELATTO, P. E.; CÉSAR, A. R. P.; CIAMBELLI, J. R. P.; GURGEL, M. N. do A.; SOUZA, R. T. G. de. Integrated production of organomineral biofertilizer (BIOFOM®) using by-products from the sugar and ethanol agro-industry, associated with the cogeneration of energy. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 27, p. 1-9, 2010b.
- OLIVÉRIO, J. L.; BOSCARIOL, F.; PEREIRA CÉSAR, A. R.; GURGEL, M. N. A.; MANTELATTO, P. E.; YAMAKAWA, C. K. Water production plant. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 27, p. 1-6, 2010a.
- OLIVÉRIO, J. L.; CARMO, V. B.; GURGEL, M. N. A. The DSM – Dedini Sustainable Mill: a new concept in designing complete sugarcane mills. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technology**, v. 27, p. 1-32, 2010c.
- ORLANDO FILHO, J. **Absorção dos macronutrientes pela cana-de-açúcar (Saccharum spp.) variedade CB41-76, em três grandes grupos de solos no Estado de São Paulo.** 1978. 154 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- ORLANDO FILHO, J.; SILVA, G. M. A.; LEME, E. J. A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: ORLANDO FILHO, J. (coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Planalsucar, 1983. p. 229-264.
- PAN, Y. C.; EOW, K. L.; LING, S. H. The effect of bagasse furnace ash on the growth of plant cane. **Sugar Journal**, v. 42, n. 7, p. 14-16, 1979.
- PENATTI, C. P. **Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência.** Itu: Ottoni editora, 2013. 347 p.
- PEREIRA, L. R. **Dinâmica do nitrogênio amídico (15N-uréia) e amoniacal (15N-aquamônia) no solo aplicado conjuntamente com o co-produto do ácido glutâmico (Ajifer).** 2008. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- PIACENTE, F. J. **Agroindústria canavieira e o sistema de gestão ambiental: o caso das usinas localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.** 2005. 177 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- PINEDA, F. A. Filder mud and bagasse ash as a profitable fertilizer. **Sugar y Azucar**, v. 51, n. 14, p. 44-45, 1956.

PLANALSUCAR. **Relatório anual da seção de solos e adubação**. Rio Largo, 1980. 78 p.

PRIMAVESI, O.; KORNDÖRFER, G. H.; DEUBER, R. Extração de minerais por colmos de cinco variedades de cana-planta em três solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBSC, 1992. p. 160-161.

PURCHASE, B. S. Disposal of liquid effluents from cane sugar factories. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 22, p. 49-54, 1995.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo: Fundag, 1997. 285 p. (IAC. Boletim técnico, 100).

RAMALHO, J. F. G. P.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. do. Metais pesados em solos cultivados com cana-de-açúcar pelo uso de resíduos agroindustriais. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 120-129, jan./dez. 2001.

RANZANI, G. Consequências da aplicação do restilo ao solo (I). **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, v. 12-13, p. 57-67, 1956. DOI: 10.1590/S0071-12761956000100013.

RODRIGUES, R. Bagaço e álcool. **Revista Agroanalysis**, v. 21, n. 12, p. 66, dez. 2001.

ROSENFELD, U.; BAPTISTELLA, J. R.; LEME, E. J. A. Aplicação de vinhaça por aspersão em Latossolo Roxo. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 2., Rio de Janeiro, 1981. **Anais...** Rio de Janeiro: Stab, 1981. p. 235-248.

ROSSETTO, A. J. Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: PARANHOS, S. B. (coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987, v. 2. p. 435-504.

ROSSETTO, A. J.; MEDEIROS, A. M. L.; RESENDE, L. C. L.; MILLER, L. C. Companhia industrial e agrícola São João – subprodutos da indústria canavieira. **Saccharum STAB**, v. 7, p. 45-54, 1984.

ROSSETTO, A. J.; RESENDE, L. C. L.; ALONSO, J. C.; BUSSIOLY FILHO, S.; MARQUERON, L. N.; ALTENFELDER SILVA, J.; MILLER, L. C. Sistemas de distribuição de vinhaça na usina São João. **Saccharum STAB**, v. 1, n. 3, p. 37-47, 1978.

ROSSETTO, R. Aspectos ambientais do uso da vinhaça. In: SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE CANA-DE-AÇÚCAR, 10., 2006, Recife. **Anais...** Recife: Stab, 2006. 1 CD-ROM.

ROSSETTO, R.; BERTON, R. S.; LANDELL, M. G. A.; MATTIAZO, M. E. Produtividade e nutrientes na cana-de-açúcar em solo tratado com composto de Lixo Urbano. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 20, p. 28-31, 2002.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Adubação: resíduos alternativos**. 2006. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-açúcar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html. Acesso em: 23 jul. 2021.

ROSSI, M. F.; RIOS, R. P. A importância da contabilidade ambiental na evidencição de investimentos sustentáveis. **Revista Eletrônica Gestão e Negócios**, v. 5, n. 1, 2014.

SAGARRA, A. F. Bagaço: composição, conservação, armazenamento e aproveitamento industrial. In: SEMANA DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA, 3., 1966, Piracicaba. **Fermentação do mel final das usinas de açúcar**. Piracicaba: Instituto Zimotécnico, 1966. p. 280-294.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. Coordenadoria de Licenciamento Ambiental e de Proteção de Recursos Naturais. **Súmula de Parecer Técnico CPRN/DAIA/166/08**. 2008. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/consema/2011/11/oficio_consema_2008_094/Sumula_do_Parecer_Tecnico_CPRN_DAIA_166-2008.pdf. Acesso em: 27 jul. 2021.

SENGIK, E.; RIBEIRO, A. C.; CONDÉ, A. R. Efeito da vinhaça em algumas propriedades de amostras de dois solos de Viçosa (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, n. 12, p. 11-15, 1988.

SILVA, A. F. S.; SILVA, F. C.; CESAR, M. A. A.; BERGAMASCO, A. F. Avaliação do efeito complementar da aplicação de composto de lixo em área adubada com fertilizantes NPK em cana-planta. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002a, Recife. **Anais...** Recife: Stab, 2002. p. 288-293.

SILVA, F. C. da. **Uso agrônômico de lodo de esgoto: efeitos em fertilidade do solo e qualidade da cana-de-açúcar**. 1995. 160 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

SILVA, F. C.; BERTON, R. S.; CHITOLINA, J. C.; BALLESTERO, S. D. **Recomendações técnicas para o uso agrícola do composto de lixo urbano no Estado de São Paulo**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2002b. 17 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Circular técnica, 3).

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; ABREU JUNIOR, C. H.; BERTON, R. S.; BASSO, L. C.; BARBIERI, V. Impactos da aplicação de lodo de esgoto na cultura da cana-de-

- açúcar e no ambiente. **Holos Environment**, v. 10, n. 1, p. 62-82, 2010. DOI: [10.14295/holos.v10i1.4233](https://doi.org/10.14295/holos.v10i1.4233).
- SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEIXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 1-8, jan. 1998.
- SILVA, F. C.; FANTE JUNIOR, L.; PILOTTO, J. E.; RODRIGUES, J. A.; BOARETTO, A. E.; OLIVEIRA, J. C. M. de; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B. Evaluating the residual effects of sludge in root distribution and heavy metals in sugar cane crop. **International Sugar Journal**, v. 102, n. 1220, p. 424-430, 2000.
- SILVA, F. C.; FANTE JÚNIOR, L.; RODRIGUES, J. A.; PILOTTO, J. E.; BOARETTO, A. E.; OLIVEIRA, J. C. M.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B. Efeitos do lodo de esgoto na distribuição radicular e nos teores de metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Biociências**, v. 2, n. 2, p. 125-139, 1996.
- SILVA, M. A. S. da; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007a.
- SOUSA, S. A. V. de. Métodos de utilização e aplicação de vinhaça. In: WORKSHOP TECNOLÓGICO SOBRE VINHAÇA, 2007, Jaboticabal. [Anais...]. Jaboticabal: Unesp, 2007.
- SPEECE, R. E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. **Environmental Science & Technology**, v. 17, n. 9, p. A416-A427, 1983. DOI: [10.1021/es00115a725](https://doi.org/10.1021/es00115a725).
- STAFFORD, D. A. Anaerobic fermentation. **Journal of Society Dairy Technology**, v. 45, n. 3, p. 84-89, Aug. 1992.
- STUPIELLO, J. P. A cana-de-açúcar como matéria prima. In: PARANHOS, S. B. (coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 761-804.
- TASSO JÚNIOR, L. C.; MARQUES, M. O.; FRANCO, A.; NOGUEIRA, G. de A.; NOBILE, F. O. de; CAMILOTTI, F.; SILVA A. R. da. Produtividade e qualidade de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 276-283, Apr. 2007. DOI: [10.1590/S0100-69162007000100022](https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100022).
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (São Paulo). **Produção e uso do etanol combustível no Brasil: respostas às questões mais frequentes**. São Paulo: Unica, 2007. 68 p.
- VASCONCELOS, J. N. de; OLIVEIRA, C. G. de. Composição química dos diferentes tipos de vinhaça das destilarias de álcool de Alagoas - safra 1978/79. **Saccharum STAB**, v. 4, n. 14, p. 32-36, 1981.
- WALDHEIM, L.; MORRIS, M.; LEAL, R. L. V. Biomass power generation: sugarcane and trash. In: BRIDGWATER, A. V. (ed.). **Progress in thermochemical biomass conversion**. Oxford: Blackwell, 2001. p. 509-523. DOI: [10.1002/9780470694954.ch41](https://doi.org/10.1002/9780470694954.ch41).
- WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J.; OWENS, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 63-102, 2000. DOI: [10.1016/S0961-9534\(00\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00017-9).
- WWF. Disponível em: http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/%20%20em%2023/03/2023. Acesso em: 17 jan. 2024.
- ZAMBELLO JÚNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. Utilização de resíduos da agroindústria, como complemento à adubação mineral da cana-de-açúcar. **Brasil açucareiro**, v. 95, p. 74-81, 1982.

Apêndice A

Redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE) no ciclo de vida de produção do etanol a partir da cana-de-açúcar com a implantação da Usina Sustentável Dedini (USD)

Este texto apresenta um balanço das emissões de CO₂ do ciclo de vida de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, considerando uma usina padrão usual como referência, para comparação das emissões evitadas com a implantação das novas tecnologias da Usina Sustentável Dedini (USD).

A metodologia adotada considerou, como referência, uma usina padrão, conforme Macedo e Seabra (2008)¹.

Como resultados, são apresentados cinco estágios de evolução, conforme a introdução de nova tecnologia, partindo-se do aumento da produtividade, uso de sistema mais eficiente de geração de excedente de energia elétrica, uso de 50% de palha como energético, uso de biofertilizante, uso de biodiesel (5% nos caminhões e 30% nos tratores), uso de 100% de palha como energético e substituição de 100% do diesel utilizado na usina por biodiesel.

Para cada estágio/inação, apresentam-se as emissões geradas, as emissões evitadas, o balanço líquido de emissões e a relação de comparação com as emissões geradas pela gasolina. Como metodologia, foram adotados os critérios usados por Macedo e Seabra (2008), conside-

rando quatro grupos no ciclo de vida de emissões do etanol:

Grupo 1 – Fluxos de carbono associados com absorção do carbono atmosférico e sua gradual liberação por oxidação. São considerados para este grupo os seguintes itens: absorção de carbono atmosférico (fotossíntese); liberação de carbono durante a queimada da cana (cerca de 80% das pontas e folhas, com eficiência de aproximadamente 90%); oxidação de resíduos não queimados no campo; liberação do CO₂ na fermentação da sacarose (etanol); liberação de CO₂ pela combustão do bagaço (usina ou outras indústrias); liberação de CO₂ pela combustão do etanol em motores de automóveis. Esses fluxos de emissões são considerados praticamente “neutros”, no total, exceto pelo aumento do teor de carbono no solo.

Grupo 2 – Fluxos de carbono associados com o uso de combustíveis e na produção de todos os insumos usados na agricultura e na indústria; também na fabricação de bens de capital usados na agricultura e na indústria, na fabricação de equipamentos, prédios, instalações e manutenção, sendo considerados: liberação de CO₂ no uso de combustíveis fósseis na agricultura (inclusive transportes); liberação de CO₂ devido ao uso de combustíveis fósseis na produção de insumos agrícolas (mudas, herbicidas, fertilizantes, etc.); liberação de CO₂ devido ao uso de combustíveis fósseis na produção de equipamento agrícola e na sua manutenção; liberação de CO₂ no uso de combustíveis fósseis na fabricação de equipamentos, construção de prédios e manutenção na área industrial. Esses fluxos são negativos (aumentam o CO₂ atmosférico).

Grupo 3 – Fluxos de gases de efeito estufa (GEEs) não associados com o uso de combustíveis fósseis são principalmente N₂O e CH₄. Foram considerados: liberação de outros GEEs (não CO₂) no processo de queima de cana; liberação de N₂O do solo, a partir do uso de fertilizantes;

¹ MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A. Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol. In: ZUURBIER, P.; VOORE, J. van de. (ed.). **Sugarcane ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment.** The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2008. p. 95-111.

liberação de outros GEEs (CO_2) na combustão de bagaço nas caldeiras; liberação de outros GEEs (não CO_2) na combustão de etanol nos motores. Esses fluxos também são negativos (aumentam o CO_2 atmosférico).

Grupo 4 – Este grupo inclui as emissões evitadas com o aumento da produtividade do uso do etanol na substituição de gasolina; emissões evitadas de GEEs na substituição de óleo combustível pelo bagaço para geração de energia excedente, na substituição de diesel por biodiesel produzido na própria usina e na substituição de fertilizantes minerais por fertilizantes organominerais (Biofom). São avaliadas as emissões dos grupos 2, 3 e 4; para o grupo 1, o balanço líquido é zero. Também se observa que as emissões dos grupos 2 e 3 são cerca de dez vezes menores que as do grupo 4, sendo normal para sistemas totalmente baseados em biomassa. Portanto, para o balanço de emissões teremos os seguintes itens:

- a) Emissões geradas: combustíveis fósseis, CH_4 e N_2O da queima da palha, N_2O do solo.
- b) Emissões evitadas: uso de bagaço excedente, uso do etanol, substituição do diesel pelo biodiesel, substituição do fertilizante mineral pelo fertilizante organomineral (Biofom).
- c) Emissões evitadas líquidas: é a diferença entre as emissões geradas e as emissões evitadas no ciclo, sendo, então, comparadas com as emissões geradas pela gasolina.

Para a realização da comparação dos balanços de emissões de GEEs, foram estudadas as seguintes etapas: 1) Produção de cana-de-açúcar; 2) Processamento da cana-de-açúcar; 3) Distribuição do etanol; 4) Uso do etanol. Em cada etapa, foram considerados os itens de consumo de combustível fóssil e as devidas emissões (geradas ou evitadas) em quilograma de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro produzido. Os dados básicos considerados na referência de Macedo

e Seabra (2008) foram obtidos a partir de parâmetros de performance do levantamento feito pelo Centro de Tecnologia Canavieira, referentes às safras 2005/2006 e 2006/2007 em 44 usinas associadas. Essas usinas estão localizadas na região Centro-Sul do Brasil, a qual é responsável por 90% do etanol produzido no País.

Os resultados são apresentados por meio da comparação com as emissões da gasolina, ou seja, 2.280 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro. A usina de referência apresentou uma emissão líquida de 260 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro, evitando 88% das emissões comparadas com as da gasolina.

Com a introdução de novas tecnologias para aumentar a produtividade, passando de 86,3 L de etanol por tonelada de cana (tc) para 89,8 L de etanol por tc, obteve-se a emissão líquida de 241 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro, que evita 89% das emissões comparadas com as da gasolina.

Em seguida, com a introdução de tecnologias no estado da arte, aumentando a geração de excedente de energia elétrica, passando de 9,2 para 50,7 MW; e a introdução do biodiesel integrado à usina para substituição de 5% do diesel consumido pelos caminhões e 30% do diesel consumido pelos tratores; bem como com a introdução do Biofom, substituindo grande parte do uso de fertilizantes minerais, obteve-se como emissão líquida (-) 269 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro, que evita 112% das emissões comparadas com as da gasolina.

Com a introdução de 50% de palha como energético, a emissão líquida passou a (-) 740 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol anidro, o que evita 132% das emissões comparadas com as da gasolina. Com a introdução de 100% de palha como energético, a emissão líquida passou a (-) 2.615 kg de CO_2 por metro cúbico de etanol

anidro, o que evita 215% das emissões comparadas com as da gasolina.

Com a substituição de 100% do diesel utilizado pelo biodiesel, a emissão líquida passou a (-) 4.991 kg de CO₂ por metro cúbico de etanol anidro, o que evita 219% das emissões comparadas com as da gasolina.

Uma usina que processa 2.160.000 t de cana-de-açúcar por safra, com a produção de 186.408.000 L de etanol por safra, no modelo considerado como referência, evita a liberação de 2,02 ou 2,20 kg de CO₂ por litro de etanol anidro. Portanto, no final da safra, a emissão evitada é de 410.097.600 kg de CO₂. Com a introdução de novas tecnologias — aumento da produtividade na produção de etanol, integração com a produção de biodiesel, maior geração de excedente de bioeletricidade e a produção

de Biofom —, evita-se a emissão de 2,97 kg de CO₂, acima dos 2,02 kg de CO₂ por litro de etanol anidro da referência, totalizando 4,99 kg de CO₂ por litro de etanol anidro. Portanto, no ciclo completo, a emissão de CO₂ pelo etanol é 219% menor que a da gasolina, conforme mostrado na Figura A1.

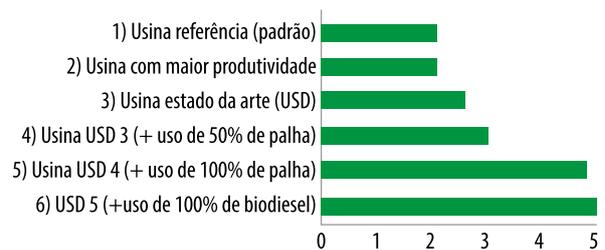


Figura A1. Emissões de CO₂ (quilograma) evitadas na produção de etanol (litros) ao serem tomadas com a implantação das novas tecnologias da Usina Sustentável Dedini (USD).