



Pecuária Sudeste Uva e Vinho

Ambiental é uma temática bastante estudada e aplicada ao âmbito urbano, aí incluída a área rural. Entretanto, é na gestão ambiental rural que se encontram os recursos básicos necessários à gestão ambiental. Por isso a necessidade, captada pela Embrapa, de direcionar trabalhos de pesquisa para essa área, adotando ações voltadas ao desenvolvimento sustentável do ambiente produtivo para a agropecuária.

Por uma didática prática, baseada em muitos exemplos, esta obra permite ao leitor resolver uma série de problemas relacionados à gestão ambiental na agropecuária. Endereçada a uma vasta clientela, incluindo estudantes e governantes, seu interesse é comentar a tomada de decisão por parte de produtores rurais, profissionais agropecuários, líderes comunitários e demais envolvidos em decisões sobre gestão ambiental no meio rural.

Continuando a linha editorial do primeiro volume, este livro apresenta os recentes avanços da pesquisa sobre gestão ambiental na agropecuária, por meio de uma linguagem acessível ao usuário final, mesmo àquele que não possui experiência nessa área.

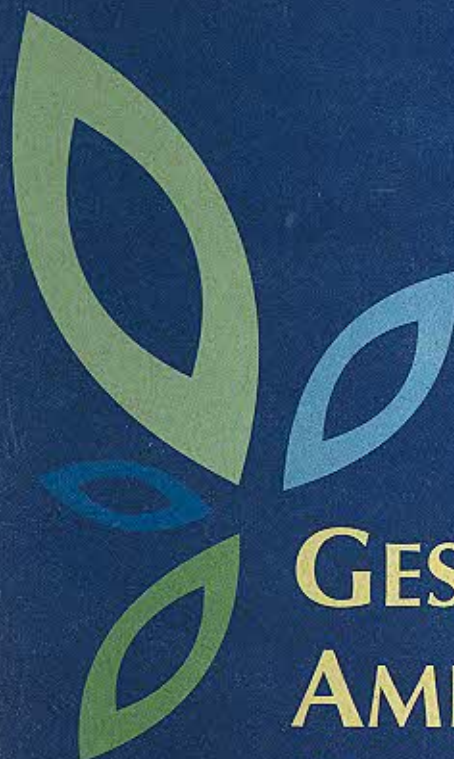
Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento



CGPE 10195

Volume 2

GESTÃO AMBIENTAL NA AGROPECUÁRIA



GESTÃO AMBIENTAL NA AGROPECUÁRIA

Volume 2

*Julio Cesar Pascale Palhares
Luciano Gebler*

Editores Técnicos



Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Pecuária Sudeste
Rodovia Washington Luiz, km 234,
Fazenda Canchim
CEP 13560-970 São Carlos, SP
Fone: (16) 3411-5600
Fax: (16) 3361-5754
www.cppse.embrapa.br
cppse.sac@embrapa.br

Embrapa Uva e Vinho
Rua Livramento, 515
CEP 95700-000 Bento Gonçalves, RS
Fone: (54) 3435-8000
Fax: (54) 3451-2792
www.cnpuv.embrapa.br
cnpuv.sac@embrapa.br

Unidades responsáveis pelo conteúdo
Embrapa Pecuária Sudeste
Embrapa Uva e Vinho

Comitê Local de Publicações

Presidente
Ana Rita de Araujo Nogueira

Secretário-executivo
Simone Cristina Méo Nicuira

Membros
Ane Lisye Fiala Garcia Silvestre
Maria Cristina Campanelli Brito
Milena Ambrosio Telles
Sônia Borges de Alencar

1ª edição
1ª impressão (2014): 1.000 exemplares

Embrapa Informação Tecnológica
Parque Estação Biológica (PqEB)
Av. W3 Norte (Final)
CEP 70770-901 Brasília, DF
Fone: (61) 3448-4236
Fax: (61) 3448-2494
www.embrapa.br/livraria
livraria@embrapa.br

Unidade responsável pela edição
Embrapa Informação Tecnológica

Coordenação editorial
Selma Lúcia Lira Beltrão
Lucilene Maria de Andrade
Nilda Maria da Cunha Sette

Supervisão editorial
Josmária Madalena Lopes

Revisão de texto
Rafael de Sá Cavalcanti

Normalização bibliográfica
Márcia Maria Pereira de Souza

Projeto gráfico e editoração eletrônica
Júlio César da Silva Dellino

Capa
Júlio César da Silva Dellino

Fotos da quarta capa
Marco Antonio Bragaia, Ailton Kunz, Caroline
Alves Galharte, Martha Mayumi Higarashi, Julio
Cesar Pascale Palhares

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação,
no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Informação Tecnológica

Gestão ambiental na agropecuária / Julio Cesar Pascale Palhares, Luciano Gebler, editores
técnicos. - Brasília, DF : Embrapa, 2014.
v. 2 (490 p.) : il. color. ; 16 cm x 22 cm.
ISBN 978-85-7035-302-3

1. Produção animal. 2. Impacto ambiental. 3. Meio ambiente. 4. Solo. I. Palhares,
Julio Cesar Pascale. II. Gebler, Luciano. III. Embrapa Pecuária Sudeste. IV. Embrapa Uva
e Vinho.

CDD 574.5248

© Embrapa 2014

AUTORES

Ailton Kunz

Químico, doutor em Química Ambiental, pesquisador da Embrapa Suínos e Aves, Concórdia, SC
airton.kunz@embrapa.br

Alexandre Berndt

Biólogo, doutor em Ecologia de Agroecossistemas, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP
alexandre.berndt@embrapa.br

André Rodrigo Farias

Geógrafo, mestre em Geografia, analista de geoprocessamento da Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, RS
andre.farias@embrapa.br

Bruna Moreira Schrammel

Engenheira-agrônoma, mestranda em Produção Vegetal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC
brunaschrammel@hotmail.com

Bruno José Rodrigues Alves

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ
bruno.alves@embrapa.br

Caroline Alves Galharte

Bacharel em Letras, doutora em Ciências da Engenharia Ambiental, consultora do Instituto Mato-Grossense do Algodão, Cuiabá, MT
carol.galharte@gmail.com

Celso Aita

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, professor associado da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS
celsoaita@gmail.com

Cláudia Ana Reczko

Acadêmica de Geografia, bolsista da Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, RS
anareczko@yahoo.com.br

ANEXO I

Planilha de decisão	Sim	Não
Quando são detectados vazamentos, os reparos são feitos imediatamente?		
5. Mão de obra		
Possui projeto, elaborado por técnico especializado, para os sistemas de captação, armazenamento, distribuição, drenagem das águas e tratamento de efluentes?		
A mão de obra está capacitada para realizar o manejo hídrico cotidiano da criação?		

Capítulo 4



USO DA VINHAÇA DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO FERTILIZANTE

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA E IMPACTOS
AMBIENTAIS

Marcio Roberto Soares
José Carlos Casagrande
Rodrigo da Silveira Nicoloso

INTRODUÇÃO

A produção de cana-de-açúcar vem se destacando no País em função da crescente demanda por combustíveis renováveis e pelos preços elevados do petróleo no mercado internacional. O relatório de acompanhamento da safra brasileira 2012/2013 de cana-de-açúcar, publicado pela Companhia Nacional de Abastecimento (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2012), atualizou o panorama da canavieira no Brasil. A área cultivada com cana-de-açúcar nessa safra, para atender ao setor sucroalcooleiro, está estimada em 8,6 milhões de hectares, com uma expansão registrada em 620 mil hectares em relação ao período anterior (2011/2012). A produtividade média aumentou 2,9%, atingindo 70,3 t ha⁻¹. Com isso, estima-se que o total de cana-de-açúcar moída na safra 2012/2013 será de 602,2 milhões de toneladas, das quais 50,2% serão destinadas à produção de 9,7 bilhões de litros de etanol anidro e de 14,2 bilhões de litros de etanol hidratado. O processamento da cana-de-açúcar na agroindústria envolve uma série de etapas, que serão brevemente descritas conforme Elia Neto et al. (2009).

Ao chegar à unidade produtora, ocorre amostragem da carga de cana-de-açúcar para determinação do teor de sacarose em laboratório. A análise determina a qualidade da matéria-prima na forma de açúcar total recuperável (ATR), índice empregado para o pagamento dos fornecedores de cana-de-açúcar, além de gerar informações úteis para o controle agrícola, para o controle de moagem e para o cálculo de rendimento industrial. Após o descarregamento, a cana-de-açúcar é preparada pela lavagem da cana inteira com água ou pela sopragem de ar da cana picada. A matéria-prima homogeneizada é encaminhada para a extração do caldo, passando por conjuntos de três rolos de esmagamento denominados ternos, que, em número de quatro a seis, compõem as moendas.

O caldo primário é aquele extraído no primeiro terno. O bagaço final, que segue para as caldeiras, é gerado após a passagem pelo último terno. A partir do segundo terno, ocorre a embebição da massa de cana-de-açúcar em água para favorecer a lixiviação da sacarose e a obtenção do caldo misto. O caldo, proveniente da etapa de extração, apresenta impurezas solúveis ou insolúveis, eliminadas por processos físico-químicos de coagulação, floculação, sulfitação, caleação, precipitação e sedimentação. O tratamento prossegue com o aquecimento do caldo a 105 °C, de modo a acelerar a floculação e a coagulação de não açúcares proteicos e a emulsificação de

ceras e graxas, propiciando aumento da eficiência de decantação. Nesse momento, tem-se, além do caldo clarificado, o lodo do fundo do decantador, o qual é submetido à filtração no intento de recuperar açúcar.

O resíduo retido no equipamento de filtração rotativa a vácuo é conhecido por torta de filtro, gerado na proporção de 20 kg–40 kg por tonelada de cana-de-açúcar e amplamente utilizado na cultura da cana-de-açúcar por causa do seu valor fertilizante, sobretudo como fonte de P. O caldo clarificado é evaporado para aumento da concentração de 15 °Brix para 60 °Brix–65 °Brix, tornando-se o xarope, que continua a ser concentrado para a formação dos cristais para a fabricação do açúcar. A evaporação origina a mistura composta de 45% de cristais, envolvidos por uma solução açucarada chamada mel. Essa massa é centrifugada e o mel recolhido retorna para a recuperação de açúcar. O mel resultante dessa segunda etapa de extração de açúcar é conhecido por melaço. A fabricação do etanol tem início com o preparo do mosto, solução açucarada obtida da mistura de diferentes proporções de caldo primário, mel, melaço e água para facilitar a definição das condições de trabalho (vazão, teor de açúcares, pH, temperatura) na condução da fermentação alcoólica. Com a redução da temperatura a 30 °C–32 °C, o mosto é inoculado com leveduras do gênero *Saccharomyces* para que ocorra a fermentação e a transformação dos açúcares em calor, gás carbônico e etanol.

O mosto fermentado é denominado vinho, o qual pode ser centrifugado para recuperação e reutilização do fermento (levedura), característica principal do processo Melle-Boinot, amplamente empregado em usinas e destilarias no Brasil. A levedura recuperada, antes de retornar ao processo fermentativo, passa por tratamento com solução de ácido sulfúrico diluído até pH 2,5, com o objetivo de eliminar bactérias indesejáveis. O mosto e o inóculo de leveduras são colocados em contato nas dornas de fermentação, por um período que varia de 6 a 8 horas para o consumo completo do açúcar e para dar origem ao vinho fermentado, cujo teor médio de etanol é de 7 °GL a 11 °GL. O vinho fermentado segue para as colunas de destilação para a separação de água, etanol, etanóis superiores, ácido acético e aldeídos, por diferentes pontos de ebulição. Na coluna "A", por injeção de vapor, gera-se uma mistura hidroalcoólica – chamada etanol de segunda (92 °GL–94 °GL) –, uma mistura de vapores hidroalcoólicos – denominada flegma (45 °GL–50 °GL) –, e o principal resíduo da destilaria, a vinhaça, com sinônimos regionais, tais como vinhoto, calda, restilo, tiborna, garapão e caxixi, e internacionais, como *still bottoms*, *slöps*, *vinasse*, *dunder*, *stillage* e *cachaza*.

O flegma, produto principal dessa fase, é direcionado à coluna "B" para o processo de retificação, no qual há elevação do grau alcoólico e geração do etanol hidratado (92,6 °INPM), além da flegmaça (resíduo da retificação do flegma), o óleo fúsel (mistura concentrada de impurezas do flegma) e etanol de segunda. Os dois últimos possuem valor econômico, enquanto a flegmaça é efluente incorporado à vinhaça. O processo pode progredir visando à produção do etanol anidro (99,3 °INPM), por meio de sua desidratação com ciclo-hexano na coluna "C". Tem-se observado uma variação da taxa de produção de vinhaça de 7 a 16 litros para cada litro de etanol produzido. Porém, há tendência de diminuir a proporção para 12 litros de vinhaça para cada litro de etanol, média bastante representativa da atual tecnologia de produção de etanol (ELIA NETO et al., 2009). Dessa forma, a produção de 23,9 bilhões de litros de etanol, a partir do ano-safra 2012/2013 de cana-de-açúcar (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2012), deverá gerar cerca de 286,8 bilhões de litros de vinhaça.

A vinhaça de cana-de-açúcar é uma suspensão marrom escura, cuja coloração acentua-se com a exposição ao ar, e que deixa a coluna de destilação de etanol a uma temperatura próxima a 107 °C (KORNDÖRFER; OLIVEIRA, 2005). É composta por 93% de água e 7% de sólidos, dos quais 75% são matéria orgânica e 25% correspondem à fração mineral. Seu odor, que vai do adstringente ao nauseante, é normalmente desagradável em vista do processo de putrefação do açúcar residual, liberando gases fétidos (SALOMON; LORA, 2009). Além da natureza ácida (pH 3,0–5,0), a vinhaça possui propriedade corrosiva, por causa do ácido sulfúrico adicionado no processo de recuperação das leveduras (ELIA NETO et al., 2009). Trata-se de um efluente com alto potencial poluidor e com alto valor como fonte alternativa de nutrientes para as plantas.

Sua carga poluente pode ser 100 vezes superior à do esgoto doméstico, em virtude dos altos teores de matéria orgânica e às elevadas Demandas Bioquímicas de Oxigênio (DBO) e Demandas Químicas de Oxigênio (DQO) (SALOMON; LORA, 2009). Uma usina de pequeno porte, com capacidade de processar 1 milhão de toneladas de cana-de-açúcar para a produção de açúcar e de etanol, tem potencial de carga poluidora na safra equivalente a de uma metrópole com 1,5 milhão de habitantes, considerando a vinhaça e os demais efluentes líquidos (ELIA NETO et al., 2009).

Não há opção para o tratamento convencional da vinhaça que possibilite atingir os padrões de lançamento em corpos d'água exigidos

pela legislação. Por isso, a vinhaça é classificada como Resíduo Sólido Classe II-A, não perigoso e não inerte, conforme a norma ABNT 10.004. Ainda que não exista solução definitiva para a destinação da vinhaça, o setor sucroenergético tem conseguido neutralizar o potencial poluidor da sua altíssima carga orgânica, conforme levantamento feito por Elia Neto et al. (2009) em 34 unidades produtoras de açúcar e etanol. A eficiência de 98,4% na remoção da carga orgânica tem sido alcançada graças à fertirrigação dos canaviais com a vinhaça, prática desenvolvida no Brasil e que constitui a principal estratégia de manejo do resíduo. Seu descarte em cursos d'água é considerado altamente nocivo à fauna, à flora, à microfauna e à microflora das águas doces. Entretanto, quando aplicada no solo, seu potencial poluidor é diminuído, pois o solo tende a resistir às mudanças de natureza química por causa das interações bióticas e abióticas com a vinhaça (ABREU JÚNIOR et al., 2005).

A composição química da vinhaça (Tabela 1) indica que a matéria orgânica é seu principal componente. No entanto, vários elementos químicos participam da sua composição, o que inclui macronutrientes primários (N-NO₃⁻, N-NH₄⁺ e, principalmente, K⁺), secundários (Ca²⁺, Mg²⁺ e SO₄²⁻) e alguns micronutrientes (Cu²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ e Zn²⁺), que também são de grande interesse para a canavicultura, fazendo com que a vinhaça fosse percebida não mais como resíduo, mas sim como subproduto.

Tabela 1. Caracterização físico-química da vinhaça de cana-de-açúcar produzida em usinas do Estado de São Paulo.

Parâmetro	Unidade	Valor médio		Valor extremo	
		1	2	Mínimo	Máximo
Alumínio (Al)	mg L ⁻¹	-	18,3	<5,0	120,0
Bário (Ba)	mg L ⁻¹	-	13,3	<10,0	25,0
Cálcio (CaO)	mg L ⁻¹	515,3	863,9	71,0	2.614,7
Chumbo (Pb)	mg L ⁻¹	-	<2,50	<2,50	<2,50
Cloreto (Cl)	mg L ⁻¹	1.219	-	480,0	2.300,0
Cobre (Cu)	mg L ⁻¹	-	0,5	<0,2	3,2
Condutividade elétrica (CE)	µS cm ⁻¹	-	6.553	3.780	12.500
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	mg L ⁻¹	16.950	16.331	5.879	75.330

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Parâmetro	Unidade	Valor médio		Valor extremo	
		1	2	Mínimo	Máximo
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg L ⁻¹	28.450	31.505	9.200	97.400
Ferro (Fe)	mg L ⁻¹	25,2	14,7	2,0	200,0
Fósforo total (P ₂ O ₅)	mg L ⁻¹	60,4	32,0	<10,0	188,0
Glicerol	mg L ⁻¹	5,9	-	2,6	25,0
Leveduras (base seca)	mg L ⁻¹	403,6	-	114,0	1.500,2
Magnésio (MgO)	mg L ⁻¹	225,6	535,0	97,0	1.112,9
Manganês (Mn)	mg L ⁻¹	4,8	4,5	1,0	12,0
Nitrogênio total (N)	mg L ⁻¹	356,6	352,5	81,2	1.214,6
Nitrogênio amoniacal (N-NH ₄ ⁺)	mg L ⁻¹	10,9	36,6	0,4	220,0
Nitrogênio nitrato (N-NO ₃ ⁻)	mg L ⁻¹	-	<0,8	<0,1	4,2
Nitrogênio nitrito (N-NO ₂ ⁻)	mg L ⁻¹	-	<0,2	<0,1	1,2
pH	-	4,2	4,8	3,5	4,9
Potássio total (K ₂ O)	mg L ⁻¹	2.035,0	2.666,6	814,0	7.611,5
Razão de adsorção de sódio (RAS)	-	2,47	1,10	0,30	4,69
Resíduos sedimentáveis (RS 1 hora)	mg L ⁻¹	2,3	7,0	0,1	40,0
Sódio (Na)	mg L ⁻¹	51,6	30,6	2,7	220,0
Sólidos dissolvidos fixos (SDF)	mg L ⁻¹	11.872	7.518	921	24.020
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	mg L ⁻¹	18.420	24.520	1.509	45.630
Sólidos dissolvidos voláteis (SDV)	mg L ⁻¹	6.580	17.004	588	29.325
Sólidos suspensos fixos (SSF)	mg L ⁻¹	294	328	<20	2.350
Sólidos suspensos totais (SST)	mg L ⁻¹	3.967	-	260	9.500
Sólidos suspensos voláteis (SSV)	mg L ⁻¹	3.632	4.901	40	15.900
Sólidos totais (ST)	mg L ⁻¹	25.155	29.596	10.780	56.780
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg L ⁻¹	1.537,6	861,2	92,3	3.363,5
Temperatura	°C	89,2	-	65,0	110,5
Zinco (Zn)	mg L ⁻¹	-	<1	<0,5	4,6

Fonte: adaptado de Elia Neto et al. (2009), (1) Elia Neto e Nakahodo (1995) e (2) Elia Neto e Zotelli (2008).

O uso de resíduos com alto teor de matéria orgânica e de nutrientes constitui prática interessante e bem aceita no setor sucroenergético, pois, além de reduzir os custos com a aplicação de fertilizantes, permite que a destinação dos "resíduos" esteja alinhada com a legislação. A ausência de contaminantes orgânicos e inorgânicos e de patógenos torna o resíduo apto para a aplicação imediata no solo, sem tratamento prévio. A concentração de nutrientes da vinhaça varia entre as unidades produtoras, com oscilações ao longo da safra e até no mesmo dia, atribuídas a fatores da matéria-prima, como a moagem de diferentes variedades, provenientes de ambientes de produção distintos, e a heterogeneidade dos índices de maturação, ciclos e período de colheita, e a fatores tecnológicos do processo de produção do etanol (ROSSETTO et al., 2010a, 2010b). Além disso, a natureza do mosto é decisiva para a concentração de nutrientes na vinhaça, sendo evidentes as variações entre mosto de caldo, mosto de melaço e mosto misto (Tabela 2).

O conhecimento da composição química da vinhaça é um dos principais fatores que orientam quanto às dosagens a serem aplicadas no campo via fertirrigação (ORLANDO FILHO et al., 1983a). O conhecimento prévio dessa quantidade é determinante para alcançar produtividade sem prejudicar a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.

Tabela 2. Parâmetros quali-quantitativos de vinhaça de cana-de-açúcar procedente de mostos de melaço, de caldo e misto.

Parâmetro	Tipo de mosto			Fonte
	Melaço	Caldo	Misto	
pH	4,2–5,0	3,5–4,6	3,5–4,6	1,2,3
Temperatura (°C)	80–100	80–100	80–100	1
DBO (mg L ⁻¹ O ₂)	25.000	6.000–16.500	19.800	1
DQO (mg L ⁻¹ O ₂)	65.000	15.000–33.000	45.000	1
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	81.500	23.700	52.700	1
Sólidos voláteis (mg L ⁻¹)	60.000	20.000	40.000	1
Sólidos fixos (mg L ⁻¹)	21.500	3.700	12.700	1

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Parâmetro	Tipo de mosto			Fonte
	Melaço	Caldo	Misto	
Nitrogênio (mg L ⁻¹ N)	450-1.610	150-700	330-710	1,2,3
Fósforo (mg L ⁻¹ P ₂ O ₅)	100-350	10-610	90-610	1,2,3
Potássio (mg L ⁻¹ K ₂ O)	3.500-7.870	1.010-2.100	2.100-4.600	1,2,3
Cálcio (mg L ⁻¹ CaO)	450-5.180	130-1.540	570-4.570	1,2,3
Magnésio (mg L ⁻¹ MgO)	420-1.520	200-490	330-700	1,2,3
Sulfato (mg L ⁻¹ SO ₄ ²⁻)	1.050-6.400	600-2.030	1.600-3.740	1,2,3
Carbono (mg L ⁻¹ C)	11.200-22.900	5.700-13.400	8.700-12.100	1
Ferro (mg L ⁻¹)	52-120	45-110	47-130	2,3
Cobre (mg L ⁻¹)	3-9	1-18	2-57	2,3
Zinco (mg L ⁻¹)	3-4	2-3	3-50	2,3
Manganês (mg L ⁻¹)	6-11	5-6	5-10	2,3
Relação C/N	16,0	19,7-21,1	16,4	1
Matéria orgânica (mg L ⁻¹)	37.000-63.940	15.300-45.000	3.800-45.100	1,2,3

Fonte: (1) Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1982), (2) Glória e Orlando Filho (1983) e (3) Orlando Filho e Leme (1984).

EFEITOS DA VINHAÇA SOBRE OS ATRIBUTOS DO SOLO AGRÍCOLA

Como medida contra os efeitos da crise do petróleo de 1973, em 1975 o governo federal instaurou o Programa Nacional do Alcool (Proálcool), vinculado ao Programa Nacional de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar (Planalsucar), do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA). O agravamento da crise do petróleo em 1979 fez com que a produção de álcool aumentasse 560%. Nos anos de 1986-1987, o Proálcool atingiu

o auge, com a produção de 12,3 bilhões de litros de etanol. Conseqüentemente, desde 1975, o País passou a experimentar uma situação sem precedentes de geração de vinhaça, quando se intensificou a pesquisa sobre os efeitos de sua aplicação como fertilizante na cana-de-açúcar e no solo (ORLANDO FILHO et al., 1983b; RODELLA; FERRARI, 1977).

Existem aspectos bastante convergentes sobre as implicações da vinhaça nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, bem como sobre os aspectos fisiológicos, nutricionais e tecnológicos da cana-de-açúcar. De modo geral, relatos de benefícios da vinhaça para o solo são o incremento da fertilidade, o que inclui a diminuição da acidez e do teor de Al, aumento dos teores de matéria orgânica, de Ca, de Mg e, sobretudo, de K, aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) e da disponibilidade de P, além de proporcionar maior atividade microbiana, de aumentar a porosidade e de melhorar a estrutura (FERREIRA; MONTEIRO, 1987; FREIRE; CORTEZ, 2000; SENGIK et al., 1988). O aumento da produtividade, a melhor distribuição do sistema radicular e a melhoria das características tecnológicas, constituem vantagens trazidas pela vinhaça para a cultura da cana-de-açúcar. Do ponto de vista ambiental, destaca-se a neutralização do efeito poluidor da vinhaça e, do ponto de vista econômico, a substituição completa ou parcial da adubação mineral. Os efeitos indesejáveis são exclusivamente atribuídos à aplicação de doses excessivas de vinhaça e incluem a imobilização do N e, mais tarde, a sua lixiviação, o desbalanço entre os teores de Ca, Mg e K e, conseqüentemente, sua lixiviação, a salinização e o declínio das características tecnológicas da cana-de-açúcar.

Ribeiro e Sengik (1983) estudaram o efeito da aplicação de vinhaça sobre a dispersão de argila de seis Latossolos. Concluíram que a vinhaça pode favorecer a dispersão de argila em solos com textura média, mas tende a atuar como floculante em solos com textura argilosa, sobretudo se sua concentração de cátions for elevada. Segundo Passarin et al. (2007), a aplicação de doses de vinhaça, variando de 100-600 m³ ha⁻¹ em Latossolo Vermelho Distroférrico de textura muito argilosa, não promoveu alterações nos índices de agregação, assegurando que não houve prejuízos para a estrutura do solo.

As alterações do pH provocadas pela adição de insumos ao solo precisam ser compreendidas, pois terão, entre outras implicações, influência direta na disponibilidade de nutrientes. A incorporação de fontes de carbono no solo causa a diminuição da acidez, por meio de mecanismos que

variam desde simples reação de neutralização da acidez do solo por compostos alcalinos, inorgânicos ou orgânicos, a até reações de oxirredução, com grande consumo de prótons do solo (REIS; RODELLA, 2002). O que normalmente verifica-se é a acidificação até os primeiros 15 dias após a aplicação da vinhaça no solo, como resultado imediato da acidez original do resíduo (Tabela 1). Com o passar do tempo, há aumento do pH do solo. Leal (1983) esclareceram que, sob condições aeróbias, ocorre a oxidação do carbono do material orgânico adicionado ao solo. Os elétrons perdidos pelo carbono orgânico são recebidos ou pelo O_2 , que adquire a conformação do íon O_2^- , de forte característica básica, ou pelo íon H^+ , com consumo dos íons geradores da acidez. Além disso, a acidez trocável, representada pelos íons Al^{3+} , pode ser neutralizada por ácidos orgânicos ou retida pela fração orgânica coloidal presentes na vinhaça (RODELLA et al., 1983). O efeito dos ácidos orgânicos da vinhaça também pode afetar o comportamento do P no solo, melhorando sua disponibilidade. O tratamento da fração argila de um Latossolo Vermelho Distroférico com vinhaça reduziu a adsorção de P, possivelmente em razão do bloqueio dos sítios de adsorção de P pelos compostos orgânicos da vinhaça e, também, pelo aumento da carga líquida negativa da fração argila (RIBEIRO et al., 2011).

A multiplicação de microrganismos e as transformações da matéria orgânica, principalmente do N, por meio da redução do nitrato para nitrito, consomem íons H^+ , com conseqüente elevação do pH (LEAL, 1983). Mattiazzo-Prezotto e Glória (1985) verificaram com bastante nitidez as alterações de pH promovidas pela aplicação de vinhaça em diferentes solos. Ademais, observaram que a textura dos solos foi um atributo importante para a magnitude das variações de pH. Decorridos 123 dias da aplicação da vinhaça, os autores notaram que o pH de um Neossolo Quartzarênico aumentou de 4,7 para 6,4, o de um Latossolo passou de 5,7 para 6,3 e o de um Argissolo foi de 4,5 para 5,2. Dois meses depois, o pH do Neossolo não mudou, o do Latossolo baixou para 5,8 e o do Argissolo subiu para 5,8. Bébé et al. (2009) concluíram que a fertirrigação com $300 m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ de vinhaça ao longo de 3 e de 7 anos, em dois Espodosolos Ferrihumilúvicos Órticos, e por 15 anos, em um Argissolo Amarelo Distrocoeso, não alterou o pH dos solos.

Para Rodella et al. (1983), os efeitos de elevação do pH do solo podem ser efêmeros; o pH do solo deve retornar aos valores originais após um determinado período de tempo. Esse comportamento foi observado por Camargo et al. (1987), que aplicaram volumes de $100 m^3 ha^{-1}$ e de

$1.000 m^3 ha^{-1}$ de vinhaça em um Latossolo Vermelho Distrófico ao longo de um período de três anos. Houve aumento do pH e diminuição na porcentagem de saturação por alumínio. Entretanto, ambos os parâmetros tornaram-se similares aos da testemunha após um ano da última aplicação de vinhaça. O aumento do pH do solo é proporcional à dose de vinhaça adicionada e, dessa forma, variações mais evidentes de pH devem ser esperadas após altas taxas de aplicação. Com doses controladas, maiores efeitos sobre o pH não são observados até seis meses após a aplicação (ORLANDO FILHO et al., 1983a).

A alta carga orgânica da vinhaça leva à conclusão de que sua adição ao solo constitui uma prática de adubação orgânica, com os mesmos efeitos atribuídos à matéria orgânica quando adicionada ao solo (KORN-DÖRFER; OLIVEIRA, 2005; ORLANDO FILHO et al., 1983a). A matéria orgânica da vinhaça é coloidal, composta por gliceróis e ácidos fracos facilmente decomponíveis, capazes de servir de substrato para o aumento imediato da microbiota (NEVES et al., 1983). Logo, não se devem esperar efeitos persistentes e prolongados da matéria orgânica aportada ao solo pela vinhaça e, muito menos, aumentos dos teores de matéria orgânica do solo (ROSSETTO et al., 2010a).

A fertirrigação durante 35 anos com $120 m^3 ha^{-1}$ de vinhaça não promoveu alterações no conteúdo de matéria orgânica de um Cambissolo Háplico Eutrófico cultivado com cana-de-açúcar. Canelas et al. (2007) atribuíram a ausência de melhoria do compartimento orgânico do solo à queima para despalha que, além de reduzido aporte de resíduos vegetais, favorece a oxidação da matéria orgânica, naturalmente rápida no caso da vinhaça. Reis e Rodella (2002) incubaram amostras de um Cambissolo Háplico Distrófico com feijão-de-porco, esterco bovino, vinhaça, biossólido e turfa. Após 71 dias, os autores observaram que a vinhaça apresentou a maior velocidade de degradação, com mineralização de 64% do seu carbono orgânico nesse período. Além disso, apenas para a vinhaça foi obtida correlação entre o CO_2 desprendido e o pH do solo, provavelmente porque a rápida degradação do C orgânico produz um ambiente redutor, responsável pela diminuição da acidez (LEAL, 1983).

A adição de vinhaça provoca mudanças temporárias na população de microrganismos do solo, proporcionando, porém, alterações diversas em processos biológicos e químicos, como decomposição da matéria orgânica, nitrificação, desnitrificação, fixação do N_2 atmosférico, elevação do pH, etc. A vinhaça provoca aumento na atividade microbiana do solo

em consequência da adição da matéria orgânica nela contida (CASARINI et al., 1987; NEVES et al., 1983). Essa atividade é acompanhada pelo aumento na produção de mucilagem, que pode favorecer a agregação e promover aumento na estabilidade estrutural do solo (PASSARIN et al., 2007). Houve aumento substancial e temporário da população de fungos e de bactérias com a aplicação da vinhaça em um Latossolo, com inibição da população de actinomicetos. As grandes transformações microbianas resultantes da fertirrigação do solo com vinhaça não causaram elevação significativa do pH do solo (CASARIN et al., 1987). Lopes et al. (1986) estudaram a influência da aplicação contínua de vinhaça durante três anos, com doses de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, sobre a população autóctone de *Rhizobium* que nodula culturas indicadas para cultivo intercalar com cana-de-açúcar, tais como amendoim, soja, feijão e crotalária. A aplicação de alta dose de vinhaça ($1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) promoveu efeito variado sobre a população de fixadores biológicos de nitrogênio. No feijão, foram observadas diminuições de 45% e 34% do peso de nódulos para os tratamentos com $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente. Reduções de nodulação também foram observadas para soja e amendoim. Por outro lado, houve aumento da atividade simbiótica com a crotalária, sobretudo após a aplicação de $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça.

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DA VINHAÇA

Rossetto et al. (2010a) construíram um cenário hipotético para estimar os potenciais de reciclagem de nutrientes do material orgânico gerado pelo cultivo e processamento da cana-de-açúcar. Os autores consideraram a produção de aproximadamente 35 kg de torta de filtro (70% de umidade), por tonelada de cana-de-açúcar moída, e de 13 L de vinhaça, para cada litro de etanol produzido. Houve ainda a suposição de que toda a área cultivada com cana-de-açúcar foi colhida sem despalha a fogo, produzindo 5 t ha^{-1} de palhada seca. Teores médios de N, P e K nesses resíduos foram adotados conforme o relatado em referências bibliográficas. Considerando a atualização para a safra 2012/2013, a área plantada foi de 8,5 milhões de hectares, com produção de 600 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Estimou-se que 50% da produção serão destinadas à produção de 39 milhões de toneladas de açúcar e 50% para produzir 24 bilhões de litros de etanol (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2012). A Tabela 3 apresenta as quantidades estimadas de N-P₂O₅-K₂O que poderão

Tabela 3. Potencial de reciclagem anual de nutrientes contidos em resíduos da agroindústria sucroenergética.

Resíduo	Nutriente			Quantidade de resíduo	Nutriente retornado		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	% no resíduo seco				t ano ⁻¹		
Torta de filtro	1,40	1,94	0,39	3,2 milhões t ano ⁻¹	44.800	60.800	12.480
Palha	0,46	0,11	0,57	42,5 milhões t ano ⁻¹	195.500	46.750	242.250
	kg m ⁻³ vinhaça						
Vinhaça	0,37	0,60	2,03	287 bilhões L ano ⁻¹	107.625	17.220	584.045
Total					347.925	124.770	838.775

Fonte: adaptado de Companhia Nacional de Abastecimento (2012) e Rossetto et al. (2010b).

ser adicionadas pelos resíduos do setor sucroenergético, a partir da safra 2012/2013. Cerca de 348.000 t de N, 125.000 t de P₂O₅ e 839.000 t de K₂O poderão ser reciclados. O P e o N estariam na forma orgânica, e pelo menos 50% desses teores deverão ser disponibilizados lentamente. O K estaria prontamente disponível pela vinhaça, em quantidades similares às adicionadas por fertilizantes minerais.

Considerando a dose média de 150 m^3 de vinhaça $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ praticada pelas usinas e os parâmetros da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb) (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 1982) (Tabela 2), que também foram usados por Prada et al. (1998) e por Salomon e Lora (2009) para a caracterização da vinhaça, estima-se que o resíduo, se proveniente de mosto de caldo, pode levar para a lavoura de cana-de-açúcar aproximadamente 64 kg ha^{-1} de N, 248 kg ha^{-1} de K₂O e 17 kg ha^{-1} de P₂O₅, equivalentes a 145 kg de ureia, 428 kg de cloreto de potássio e 94 kg de superfosfato simples, respectivamente (Tabela 4).

Um dos trabalhos pioneiros sobre o efeito da aplicação da vinhaça sobre diversas culturas foi o de Valsechi (1955). Foram observados aumentos de 355%, 2.150% e 417% na produtividade das culturas de milho, feijão e algodão, respectivamente, com aplicação de $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça, elevada taxa volumétrica praticada na época. Mais tarde, alguns resultados positivos com a aplicação da vinhaça começaram a ser obtidos nas culturas do milho (BERTON et al., 1983), mandioca (FREIRE et al., 1983) e batata (PAULA et al., 1989).

Tabela 4. Equivalência em fertilizantes minerais por metro cúbico de vinhaça de diferentes origens.

Tipo de vinhaça	Valor médio de nutriente			Fertilizante		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ureia	Superfosfato simples	Cloreto de potássio
	kg m ⁻³			kg		
Mosto de melação	1,030	0,150	5,785	2,34	0,83	9,97
Mosto de caldo	0,425	0,110	1,650	0,97	0,61	2,84
Mosto misto	0,595	0,105	3,340	1,35	0,58	5,76

Fonte: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1982).

Paula et al. (1992) aplicaram doses de vinhaça que variaram de 30 m³ ha⁻¹ a 210 m³ ha⁻¹ em Latossolo Vermelho, com deficiência de K, cultivado com cebola. A produtividade observada com a aplicação de 160 m³ ha⁻¹ de vinhaça foi semelhante à obtida com 1,5 t da formulação NPK 4-14-8. A produção máxima esteve condicionada a teores foliares de K de 27 g kg⁻¹, sendo que a cultura da cebola extraiu, em média, 177 kg de K, adequadamente supridos pela vinhaça, para produzir 37 t ha⁻¹ de bulbo. Pereira et al. (1992) recomendaram taxas volumétricas de até 400 m³ ha⁻¹ de vinhaça para a cultura do milho cultivada em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Apesar de ter sido observada diminuição da velocidade de emergência das plântulas com o aumento das doses de vinhaça, não houve queda na germinação total. Além disso, os autores verificaram, assim como Berton et al. (1983), aumentos na produção de biomassa fresca e seca das plantas de milho, além de incrementos dos teores de K, soma de bases e CTC do solo com doses crescentes de vinhaça.

Sengik et al. (1996) observaram que os maiores acréscimos de área foliar e de matéria seca de raízes e de parte aérea de sorgo granífero foram obtidos com a aplicação de 100 m³ ha⁻¹ de vinhaça, independentemente da textura dos solos avaliados. Bataglia et al. (1986) desenvolveram experimento com a aplicação de vinhaça, como fonte de K, em laranjeiras Valência com dez anos de idade, constatando que não existiram diferenças nas propriedades químicas do solo e na nutrição, produção e qualidade do suco das plantas, em relação ao uso de cloreto de potássio. Esses fatos, somados aos benefícios nos atributos biológicos, físicos e químicos do solo, indicaram que o uso da vinhaça na citricultura é atrativo. Mascarenhas et al. (1994) conduziram ensaios com variedades de soja

em diferentes localidades durante três anos consecutivos, com doses correspondentes a 402 kg ha⁻¹, 446 kg ha⁻¹, 454 kg ha⁻¹ e 473 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de vinhaça, superiores em até três vezes os teores aplicados por adubo mineral. Tanto no solo quanto nas folhas de soja constatou-se diminuição dos teores de K com os cultivos. Paula et al. (1999) estudaram o potencial da vinhaça para substituir KCl como fonte de K, aplicando doses que variaram de 100–400 m³ ha⁻¹, na cultura do abacaxi plantada em Latossolo Vermelho. Os tratamentos com KCl (20,5 g planta⁻¹) e com 400 m³ ha⁻¹ resultaram em rendimentos superiores em 70% e 73%, respectivamente, comparados com a testemunha. Houve aumento dos teores foliares de K, bem como a elevação da porcentagem de acidez titulável e de sólidos solúveis totais dos frutos de abacaxi.

Estudando culturas com potencial de utilização na sucessão com a cana-de-açúcar, Ramos et al. (2008) aplicaram 150 m³ ha⁻¹ de vinhaça em Latossolo Roxo cultivado com três cultivares de girassol, mamona e amendoim. Os autores concluíram que a vinhaça foi prejudicial à emergência e ao desenvolvimento inicial de plantas de amendoim e, em menor grau, de girassol. Por outro lado, a vinhaça repercutiu positivamente sobre variáveis relacionadas ao vigor inicial das plântulas de mamona. Christofoleti e Bacchi (1985) observaram maiores índices de controle de capim-colchão, tiririca, guanxuma, beldroega e falsa-serralha quando os herbicidas alachlor, diuron e ametrin foram aplicados juntamente com 100–150 m³ ha⁻¹ de vinhaça, em pré-emergência sobre um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Provavelmente, a maior eficiência decorreu do efeito sinérgico produzido pela vinhaça, por elevar o poder fitotóxico dos herbicidas ou por provocar o aumento significativo da germinação das plantas daninhas e, conseqüentemente, maior exposição das radículas para a absorção do herbicida.

Embora exista o interesse pelo emprego da vinhaça em diversas culturas de interesse econômico, a maior parte do conhecimento gerado até o momento diz respeito à cultura da cana-de-açúcar, que aponta para aumento da produtividade da cultura com a aplicação da vinhaça (Tabela 5).

Não obstante, as referências bibliográficas evidenciam que os resultados mais satisfatórios foram obtidos com a aplicação racional de doses de vinhaça, fundamentadas em critérios agrônômicos e ambientais. Em alguns casos, foi verificado que a disposição de vinhaça nos canais pode substituir na íntegra a adubação mineral da cultura (KORNDÖRFER; OLIVEIRA, 2005). Penatti et al. (1988) mostraram acréscimos lineares de

Tabela 5. Produtividade e teor de sacarose (Pol) de variedades de cana-de-açúcar em função da aplicação de vinhaça.

Variedade	Produtividade (t ha ⁻¹)		Pol (t ha ⁻¹)	
	Com vinhaça	Sem vinhaça	Com vinhaça	Sem vinhaça
CB40-13	87	49	12,0	8,3
CB46-47	52	40	7,4	6,8
CB47-355	72	40	9,6	6,1
CB62-49	75	46	9,8	6,9
Co740	54	51	7,8	8,7
Co775	47	44	7,0	7,3
IAC51-205	97	48	14,9	7,1
IAC52-150	75	48	11,9	8,1
NA56-79	97	68	14,6	11,5

Fonte: Orlando Filho et al. (1983a).

produtividade de cana-de-açúcar até 150 m³ ha⁻¹ de vinhaça, em dois Latossolos de texturas diferentes. Cultivos de terceira e quarta socas da variedade RB785148 foram conduzidos por Paulino et al. (2002) em Latossolo Vermelho submetido a fertirrigação com doses de vinhaça de mosto misto variando de 150 m³ ha⁻¹ a 600 m³ ha⁻¹. As doses intermediárias de vinhaça (300 m³ ha⁻¹ e 450 m³ ha⁻¹) resultaram nos melhores índices de produtividades agrícola e industrial.

Orlando Filho et al. (1995) observaram aumentos de produtividade com a taxa volumétrica de 300 m³ ha⁻¹, mas com queda de qualidade tecnológica da matéria-prima. Medina et al. (2002) corroboraram Paulino et al. (2002) com relação ao aumento de produtividade de colmos com 300 m³ ha⁻¹ e 450 m³ ha⁻¹ de vinhaça, verificando, ainda, maior enraizamento da cana-de-açúcar na camada 0,25 m–0,50 m. Orlando Filho et al. (1983a) apresentaram resultados da aplicação de doses crescentes de vinhaça, variando de 100 m³ ha⁻¹ até 1.800 m³ ha⁻¹, que corresponderam a doses de K equivalentes a 100 kg–1.400 kg de K₂O ha⁻¹. A partir de 500 kg de K₂O ha⁻¹ foram registrados decréscimos de produtividade. Da mesma forma, a produtividade industrial, medida em pol ha⁻¹, variou de 15–20 t ha⁻¹ até a dose de 500 kg de K₂O ha⁻¹, caindo com o aumento da dose da vinhaça. Mais recentemente, Magalhães (2010) testou o efeito da aplicação de 120 m³ ha⁻¹, 240 m³ ha⁻¹ e 420 m³ ha⁻¹ de vinhaça em

Latossolo Vermelho Eutrófico cultivado com as variedades RB85-5453 e SP80-1816, no ciclo de cana-planta. A partir da dose de 240 m³ ha⁻¹ de vinhaça, houve aumento expressivo de altura das plantas e do comprimento e do diâmetro dos colmos, parâmetros que refletiram no acréscimo médio de produtividade de 20 t ha⁻¹. Houve tendência de decréscimo nos valores destes parâmetros com a adição de 420 m³ ha⁻¹ de vinhaça.

Embora se reconheça a eficiência agrônômica da utilização da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar e sua contribuição no aumento da longevidade e da produtividade de soqueiras, a constatação de efeitos indesejáveis pode ocorrer depois de alguns anos de aplicação; incidindo, particularmente, sobre os parâmetros de qualidade tecnológica da matéria-prima para a produção do álcool ou açúcar (Tabela 6).

Tabela 6. Indicadores da qualidade tecnológica e valores recomendados para a cana-de-açúcar.

Indicador ⁽¹⁾	Valor recomendado
Brix	> 18%
Pol	> 14%
Pureza	> 85%
ATR	> 15% (maior possível)
AR	< 0,8%
Fibra	1,1%–13%

⁽¹⁾ Brix = conteúdo total de sólidos no caldo (açúcares e não açúcares); Pol = teor de sacarose aparente na cana-de-açúcar; Pureza = (Pol/Brix)×100, indica qualidade da matéria-prima para produção de açúcar; ATR = açúcares redutores totais (sacarose, glicose, frutose); AR = açúcares redutores (glicose e frutose) refletem menor eficiência de recuperação de sacarose; Fibra = reflete a eficiência de extração na moenda.

Fonte: Ripoli e Ripoli (2004).

Efeitos deletérios sobre a qualidade tecnológica do caldo foram observados com frequência em condições de aplicação exagerada de vinhaça (PAULINO et al., 2002). Já foram relatados atrasos na maturação e prolongamento do ciclo da cultura, reduções nos percentuais de sacarose (Pol) e de fibras e o aumento dos teores de K em todas as partes da planta. O excesso de K na cana-de-açúcar origina o efeito melassigênico, caracterizado pelo aumento do teor de cinzas no caldo, e a síntese de sacarato em vez da

sacarose, causando dificuldades na cristalização e a conseqüente queda no rendimento industrial de produção de açúcar (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983), além de afetar a produção de etanol, uma vez que o sacarato não é fermentável. Freire e Cortez (2000) afirmaram que a aplicação de doses de vinhaça acima de $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ao longo de vários anos consecutivos pode promover outros efeitos fisiológicos indesejáveis na cana-de-açúcar, como o aumento do teor de umidade dos colmos, a redução dos teores de lignina e o agravamento do fator acamamento. Silva (1983) mostrou diminuição nos valores de Brix%, Pol% e fibra% e aumento drástico no teor de cinzas em decorrência da aplicação de doses elevadas de vinhaça, independentemente da variedade de cana-de-açúcar (Tabela 7).

Tabela 7. Comportamento tecnológico de variedades de cana-de-açúcar em solo irrigado e não irrigado com vinhaça.

Variedade	Tratamento ⁽¹⁾	Brix	Pol	Pureza	Fibra	Cinzas %
		% cana				
CB40-13	I	19,4	13,8	70,9	11,1	1,18
	NI	21,0	16,9	80,7	13,3	0,20
CB46-47	I	19,0	14,3	75,4	12,6	1,23
	NI	21,0	17,1	81,7	14,6	0,26
CB47-355	I	18,6	13,4	72,2	10,5	1,28
	NI	19,5	15,3	78,5	13,2	0,23
CB52-49	I	19,1	13,0	67,5	14,0	1,47
	NI	19,5	14,9	75,0	17,3	0,37
Co740	I	19,2	14,5	75,2	11,3	1,33
	NI	20,5	17,0	83,2	14,9	0,27
Co775	I	19,4	17,9	76,7	10,0	1,42
	NI	20,6	16,7	81,3	14,7	0,23
IAC51-205	I	19,9	15,4	77,5	12,5	1,05
	NI	18,5	14,7	79,6	15,9	0,22
IAC52-150	I	19,8	15,8	79,7	15,0	1,21
	NI	20,3	16,8	81,2	16,6	0,25
NA56-79	I	20,0	15,1	75,3	12,3	1,12
	NI	20,9	16,9	80,7	13,3	0,25

⁽¹⁾ I = irrigado com vinhaça; NI = não irrigado com vinhaça.

Fonte: Silva (1983).

Có Júnior (2008) aplicou vinhaça equivalente ao recomendado de K_2O para a cultura da cana-de-açúcar, e o dobro da quantidade em Latossolo Vermelho Eutroférico cultivado com soqueira de quinto corte da cultivar SP81-3250. As doses não provocaram alterações na percentagem de sólidos solúveis (Brix%), de sacarose (Pol%), de fibra%, de açúcares redutores e totais (AR%), de açúcares totais recuperáveis (ATR%) e na pureza, e, portanto, não comprometeram a valorização da cana-de-açúcar. Resende et al. (2006) conduziram estudo de longa duração (1983–1992 e 1992–1999) sobre os efeitos da aplicação de $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de vinhaça sobre as características tecnológicas da cultivar CB 45-3 de cana-de-açúcar, cultivada em Luvisolo Crômico Órtico. Avaliaram também o efeito da aplicação de 80 kg ha^{-1} de N-ureia. O N aplicado afetou as características tecnológicas da cana-de-açúcar, diminuindo os teores de Brix%, Pol% e fibra%. A aplicação da vinhaça, associada com a manutenção da palhada, resultou em ganho de produtividade e aumento da produção de açúcar sem afetar as características tecnológicas da cana-de-açúcar. Magalhães (2010) observou atraso de maturação das variedades RB85-5453 e SP80-1816, mesmo na dose de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça. Na maioria dos casos, a perda de qualidade tecnológica é compensada pelo ganho de produtividade de colmos.

Para cultivos de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, com expectativa de produtividade de $100\text{--}150 \text{ t ha}^{-1}$, recomenda-se que para cana-planta sejam fornecidos 30 kg ha^{-1} de N no plantio e 45 kg ha^{-1} de N em cobertura, enquanto para cada ciclo de cana-soca devem ser adicionados 100 kg ha^{-1} de N (RAIJ et al., 1997). Percebe-se que o uso da vinhaça deve estar associado à adubação nitrogenada complementar para que a cana-de-açúcar expresse melhor seu potencial produtivo. Grande número de experimentos realizados em diversas regiões do Brasil mostrou que a resposta da cana-planta ao nitrogênio é menor e menos frequente que a observada em cana-soca (JADOSKI et al., 2010). Dos 81 ensaios realizados no Estado de São Paulo por Cantarella e Raij (1985) com cana-planta, menos do que 40% mostraram resposta ao N. Conforme Azevedo et al. (1986), essa característica foi observada em plantios de cana-de-açúcar em todo o Brasil, já que apenas 20% de 135 ensaios resultaram em resposta ao N fornecido para cana-planta. Por outro lado, para as rebrotas da cultura (cana-soca), a maioria dos experimentos mostrou resposta ao fornecimento de N, principalmente na produção de colmos (PRADO; PANCELLI, 2008). Como a quantidade de vinhaça a ser aplicada

é calculada com base nos teores de K, a quantidade de N fornecida pela fertirrigação pode ser insuficiente e precisa ser complementada. Além disso, os valores típicos da relação C/N da vinhaça (Tabela 2) podem levar à imobilização de N mineral, o que sinaliza que a suplementação com N deve ser comum. Na prática, o que se verifica com frequência é o acréscimo de produtividade quando há um aporte adicional de N (ROSSETTO et al., 2010a). Nesse contexto, é importante compreender a interação entre a vinhaça e as fontes nitrogenadas normalmente empregadas em culturas de interesse econômico.

Porém, dúvidas ainda persistem sobre os efeitos da aplicação da vinhaça na dinâmica do N que ela porta, daquele já existente no solo e daquele que será adicionado via fertilizante. Orlando Filho et al. (1983a) encontraram repostas à aplicação de vinhaça de mosto misto em cana-de-açúcar cultivada em Latossolo Vermelho, incluindo seus aspectos tecnológicos, apenas quando houve complementação com 36 kg ha⁻¹ de N e com 18 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Nesse caso, a aplicação de 40 m³ ha⁻¹ de vinhaça, complementada com N e P, foi suficiente para substituir a adubação mineral da soqueira com 600 kg ha⁻¹ da fórmula 12-6-12 (Tabela 8). Schultz et al. (2010) avaliaram a aplicação de 150 m³ ha⁻¹ de vinhaça associada com o fornecimento de N-ureia (40 kg e 80 kg de N ha⁻¹) no

Tabela 8. Produtividade de cana-de-açúcar e teor de sacarose (Pol) após a aplicação de diferentes doses de vinhaça, com e sem complementação mineral.

Tratamento	Cana-de-açúcar	
	Produtividade (t ha ⁻¹)	Pol
NPK ⁽¹⁾	78,5	13,0
40 m ³ vinhaça ha ⁻¹	69,6	11,5
80 m ³ vinhaça ha ⁻¹	75,5	12,6
120 m ³ vinhaça ha ⁻¹	76,6	12,2
40 m ³ vinhaça ha ⁻¹ + NP ⁽²⁾	78,3	12,9
80 m ³ vinhaça ha ⁻¹ + NP ⁽²⁾	83,1	13,5
120 m ³ vinhaça ha ⁻¹ + NP ⁽²⁾	86,1	14,0

⁽¹⁾ 600 kg ha⁻¹ da fórmula 12-6-12. ⁽²⁾ 300 kg ha⁻¹ da fórmula 12-6-00.

Fonte: Orlando Filho et al. (1983a).

cultivo da primeira soca da cultivar RB867515 em um Argissolo Amarelo. A adubação potássica, tendo a vinhaça ou o KCl como fonte, com complementação nitrogenada apresentaram melhores rendimentos de colmos frescos. Porém, as doses de 40 kg ha⁻¹ e 80 kg ha⁻¹ de N associadas à fertilização com vinhaça apresentaram rendimentos equivalentes de colmos. Esse padrão pode ser justificado pela presença de N na vinhaça, que pode ter complementado a dose de 40 kg de N.

IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À DISPOSIÇÃO DE VINHAÇA POR FERTIRRIGAÇÃO

Historicamente, registros de lançamento da vinhaça em corpos d'água datam de 1908. Somente na década de 1950 houve a preocupação quanto aos impactos ambientais dessa prática. Concomitantemente, também foram conduzidas as primeiras pesquisas sobre os efeitos da adição da vinhaça ao solo. A proibição do seu lançamento em coleções hídricas foi instituída pelo Decreto-Lei nº 303, de 28 de fevereiro de 1967, quando então a disposição do resíduo por infiltração, sem finalidade agrícola, começou a ser praticada nas imediações das unidades produtoras. As chamadas "áreas de sacrifício" foram adotadas como medida imediata para destinar a vinhaça e atender à legislação. A partir do advento do Proálcool em 1974, houve produção intensa do resíduo e o País viveu uma fase de transição para o uso mais racional da vinhaça, visando também à proteção do solo e das águas subterrâneas.

Além dos já constatados impactos ambientais sobre águas superficiais, há relatos de que o uso continuado da vinhaça, principalmente de doses elevadas e sem critério técnico, provoca salinização e infertilidade do solo, além da poluição e comprometimento da potabilidade das águas subterrâneas. A disposição de vinhaça no solo desprovida de critérios quanto à dosagem leva ao desequilíbrio de nutrientes, que podem ser facilmente lixiviados. A apreciação da bibliografia que trata de distúrbios ambientais causados pela aplicação da vinhaça mostra que as antigas áreas de sacrifício, a falta de impermeabilização dos canais condutores, das lagoas de acúmulo e de resfriamento e dos tanques de decantação, além do emprego de doses elevadas de vinhaça pela fertirrigação, constituem formas de manejo do resíduo com risco ambiental. Por essas

razões, a aplicação da vinhaça via fertirrigação em solo agrícola é uma prática passível de licenciamento ambiental, com exigência da elaboração de estudo e de relatório de impacto ambiental, conforme a Resolução Conama nº 1 de 23 de janeiro de 1986 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986).

Atualmente no Brasil, quase 100% da vinhaça gerada é utilizada com valor fertilizante na lavoura da cana-de-açúcar, por meio da fertirrigação. No início, doses muito altas de vinhaça, que variavam de 500 m³ ha⁻¹ até 2.000 m³ ha⁻¹, foram recomendadas (ROSSETTO et al., 2010b). A discussão mais racional sobre o assunto levou em conta sua composição e seu uso como fertilizante, baseando-se, sobretudo, no teor de K da vinhaça e na recomendação da adubação potássica para cada solo. Entretanto, o grande volume de vinhaça implica alto custo da sua aspersão no campo, problema que vinha sendo contornado pelo lançamento sobre áreas menores, próximas à unidade produtora. Isso normalmente resulta em dinâmica descontrolada de elementos químicos no solo, levando ora ao acúmulo, e a conseqüente salinização, ora à lixiviação, com potencial de contaminação de águas subterrâneas.

Apesar de os estudos de violação da qualidade de águas subterrâneas por atividades agrícolas terem se iniciado mais recentemente, os problemas de lixiviação e de salinização são reconhecidamente frequentes e têm sido abordados há mais tempo. A literatura técnico-científica pouco se dedicou para averiguar problemas decorrentes da difusão de metais pesados pela vinhaça, em virtude de seus teores normalmente baixos, decorrentes da sua ausência nas etapas agrícola e agroindustrial da produção de açúcar e de etanol, estarem relacionados à presença de micronutrientes metálicos (Cu, Fe, Mn e Zn). Um dos poucos estudos é o de Ramalho e Amaral Sobrinho (2001), que estudaram os teores de Cd, Cu, Cr, Co, Mn, Ni, Pb e Zn em área de Gleissolo, com antiga lagoa de vinhaça, e de Cambissolo, submetido a irrigação com 300 m³ ha⁻¹ durante 10 anos. Concluíram que o uso de vinhaça em larga escala não trouxe risco de contaminação do solo com metais pesados. A influência das atividades agrícolas sobre o aquecimento global, o impacto da fertilização nitrogenada em vários eventos de contaminação do ar, do solo e da água, e o uso intensivo da vinhaça nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, constituem sólidas justificativas para que seu uso seja também avaliado quanto ao seu potencial emissor de gases de efeito estufa e de afetar as várias rotas de perda do nitrogênio no ambiente agrícola.

SALINIZAÇÃO

O K é o nutriente mais exportado pela cana-de-açúcar, principalmente pela soqueira, correspondendo a uma extração de 210 kg de K₂O para cada 100 t de colmos (KORNDÖRFER; OLIVEIRA, 2005). A ordem de extração de macronutrientes, tanto pela cana-planta quanto pela cana-soca, é K>N>Ca>Mg>P (SILVA; CASAGRANDE, 1983). Isso não significa, porém, que o suprimento de K deva ser desequilibrado. O solo equilibrado para o cultivo da cana-de-açúcar normalmente apresenta saturação por bases (V%) de 60%, ou seja, 60% da CTC do solo precisa estar ocupada por Ca, Mg e K. O ideal é que o K ocupe de 3%–5% da CTC, o Mg de 10%–15% e o Ca de 35%–40%, mantendo a relação K:Mg:Ca entre 1:3:9 e 1:5:25. Solos que recebem doses elevadas de vinhaça podem apresentar aumento exagerado da concentração de potássio, causando desbalanço com Ca e Mg e alterando a saturação da CTC para 14% de K, 8% de Mg e 22% de Ca (VITTI; MAZZA, 2002). O K aplicado como vinhaça pode saturar mais a CTC do solo do que a mesma quantidade aplicada como cloreto de potássio (ROSSETTO et al., 2010a). A desproporção entre Ca, Mg e K prejudica a absorção de Ca e, com alguma frequência, percebem-se sintomas visuais de deficiência em cana-de-açúcar caracterizados pelo branqueamento e enrolamento de folhas mais novas, seguidos por necrose escura (VITTI; MAZZA, 2002).

A Tabela 9 contém a análise comparativa das características da vinhaça com os parâmetros de qualidade da água de irrigação que podem ser usados na avaliação da água superficial, subterrânea, e de drenagem, além de efluentes e de águas residuárias (AYERS; WESTCOT, 1985). É esperado que os altos teores de K e o aporte potencial de sódio (Na) pela vinhaça (Tabela 1) possam aumentar a condutividade elétrica e resultar em problemas de salinização do solo (BEBÉ et al., 2009; BRITO et al., 2007, 2009). Porém, a vinhaça apresenta baixo potencial de salinização, afeta pouco a permeabilidade do solo e tem pouca toxicidade em relação ao íon Na. Normalmente, solos cultivados com cana-de-açúcar possuem níveis adequados de Ca e de Mg e baixos teores de Na, gerando baixa razão de adsorção de Na (RAS). Os teores do íon cloreto (Cl⁻) podem enquadrar a vinhaça como efluente de grau severo de restrição para uso. Apesar de alguns registros de toxicidade por Cl⁻ em algumas culturas irrigadas (ANDRADE et al., 2009), nenhum efeito tóxico tem sido verificado em canaviais fertirrigados com vinhaça (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009).

Tabela 9. Comparação de resultados da análise físico-química da vinhaça com as diretrizes¹ para a interpretação da qualidade da água para irrigação.

Problema potencial	Grau de restrição para uso				Vinhaça ²	
	Nenhuma	Ligeira a moderada	Severa	Médio	Valores extremos	
					Mínimo	Máximo
Salinidade⁽¹⁾						
CE (dS m ⁻¹)	<0,7	0,7–3,0	>3,0	6,55	3,78	12,50
SDT (mg L ⁻¹)	<450	450–2.000	>2.000	-	-	-
Infiltração⁽²⁾						
RAS – 0–3 e CE –	>0,7	0,7–0,2	<0,2	-	-	-
– 3–6 –	>1,2	1,2–0,3	<0,3	-	-	-
– 6–12 –	>1,9	1,9–0,5	<0,5	-	-	-
– 12–20 –	>2,9	2,9–1,3	<1,3	-	-	-
– 20–40 –	>5,0	5,0–2,9	<2,9	-	-	-
Toxicidade por íons específicos⁽³⁾						
Sódio (Na)						
Irrigação por superfície (RAS)	<3	3–9	>9	2,47	0,3	4,69
Irrigação por aspersão (meq L ⁻¹)	<3	>3	-	2,24	0,11	9,57
Cloreto (Cl)						
Irrigação por superfície (meq L ⁻¹)	<4	4–10	>10	34,80	13,71	65,71
Irrigação por aspersão (meq L ⁻¹)	<3	>3	-	-	-	-
Boro (B) (mg L ⁻¹)						
	<0,7	0,7–3	>3	-	-	-
Outros⁽⁴⁾						
Nitrogênio (N-NO ₃ ⁻ , mg L ⁻¹)	<5,0	5–30	>30	<0,8	<0,1	4,2
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	<1,5	1,5–8,5	>8,5	-	-	-
pH	Faixa normal: 6,5–8,4			4,15	3,50	4,90

⁽¹⁾ Afeta a disponibilidade de água para a cultura. ⁽²⁾ Avaliada usando a CE e RAS conjuntamente.

⁽³⁾ Afeta culturas sensíveis.

CE = condutividade elétrica; SDT = total de sais em solução; RAS = relação de adsorção de sódio (Na); RAS = $\text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]$ ⁽⁴⁾.

Fonte: (1) Ayers e Westcot (1985) e (2) Elia Neto et al. (2009).

Lyra et al. (2003) avaliaram os efeitos da aplicação da vinhaça conforme as diretrizes de Ayers e Westcot (1985) (Tabela 9) e classificaram a vinhaça como fonte de grau de restrição severo para o manejo do solo agrícola. A água subterrânea analisada após a aplicação da vinhaça não apresentou restrição para uso, indicando que a passagem da vinhaça pelo solo promoveu alterações qualitativas positivas.

A análise isolada dos parâmetros da vinhaça quanto a sua qualidade para irrigação pode distorcer a avaliação do seu impacto no solo no que se refere à salinização. Uma análise complementar pode levar em conta os critérios adotados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), tais como a condutividade elétrica (CE a 25 °C), a porcentagem de sódio trocável, a razão de adsorção de sódio e o pH do solo, verificar a possibilidade de se tratar de um solo afetado por sais e buscar classificá-lo como salino, sódico ou salino-sódico (Tabela 10).

Tabela 10. Parâmetros e sistema de classificação de solos afetados por sais.

Classificação	CE ⁽¹⁾ (dS m ⁻¹)	PST ⁽²⁾ (%)	RAS ⁽³⁾	pH
Salino	≥4,0	<15	<13	<8,5
Sódico	<4,0	≥15	≥13	≥8,5
Salino-sódico	≥4,0	≥15	≥13	≥8,5

⁽¹⁾ Condutividade elétrica do extrato da pasta de saturação do solo. ⁽²⁾ Porcentagem de sódio trocável calculada com base na CTC efetiva; PST = $(\text{Na}/\text{CTC}) \times 100$. ⁽³⁾ Relação de adsorção de sódio = RAS; RAS = $\text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]$ ⁽⁴⁾.

Fonte: Freire e Freire (2007).

A salinidade do solo afeta o crescimento das plantas, principalmente pelo aumento da pressão osmótica do meio, reduzindo a disponibilidade de água. Nas áreas de sacrifício, que recebiam mais de 10.000 m³ ano⁻¹ de vinhaça, ocorriam altas concentrações de sais, facilmente notadas pela baixa resistência da cana-de-açúcar a estresses hídricos. Para as taxas volumétricas de aplicação de vinhaça (150 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) praticadas atualmente pelas unidades produtoras em atendimento à legislação (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2006), cujos teores de K₂O ficam entre 2–3 kg m⁻³, não deve haver expectativa de salinização do solo.

Camargo et al. (1987) adicionaram vinhaça em Latossolo Vermelho Distrófico e monitoraram alterações químicas das camadas 0 cm–10 cm, 10 cm–40 cm e 40 cm–80 cm por três anos. Os teores de cátions remanescentes na zona insaturada do solo não foram suficientes para caracterizar um quadro de salinização porque mais de 60% dos teores de Ca, Mg e K, adicionados por 1.000 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de vinhaça, não foram detectados até 80 cm, tendo sido perdidos por lixiviação.

LIXIVIAÇÃO DE POTÁSSIO (K) E DE NITROGÊNIO (N)

O aumento demasiado da saturação da CTC do solo por Ca, Mg, K e Na mantém importantes concentrações desses cátions em solução que, se não forem absorvidos pelas raízes das plantas, lixiviam ou percolam pelo perfil do solo. Isso pode ocorrer com a maioria dos constituintes da vinhaça (Tabela 1), na medida em que a capacidade do solo em atuar como um filtro atenuador tenha sido esgotada. A mobilidade vertical de íons e moléculas no perfil do solo pode ocasionar desconformidades na qualidade das águas subterrâneas. Brito et al. (2007) usaram colunas de lixiviação preenchidas com amostras de Nitossolo Háplico, Argissolo Amarelo e Espodossolo Cárbico, submetidas a doses de vinhaça equivalentes a 350 m³ ha⁻¹ e 700 m³ ha⁻¹. Após incubação de 30 e 60 dias, foi analisada, além dos teores de DBO₅, DQO e pH, a condutividade elétrica no percolado. Os resultados indicaram que os solos tiveram elevada capacidade de atenuar o potencial poluente da vinhaça, não havendo implicações ambientais nessas condições.

Por outro lado, Lyra et al. (2003) estudaram o comportamento da vinhaça em Espodossolo e Gleissolos, com profundidade do lençol freático variando de 1,0 m–1,4 m, aos 5 e 35 dias após a aplicação de 300 m³ ha⁻¹. Além da redução de 99% dos 11.000 mg L⁻¹ de DBO da vinhaça, a condutividade elétrica original da vinhaça baixou de 14 dS cm⁻¹ para 1 dS cm⁻¹ na água coletada a 2 m de profundidade. Para os autores, o impacto sobre a qualidade de água do lençol freático foi consideravelmente minimizado, mas não o suficiente para garantir o atendimento a todas as exigências dos parâmetros ambientais da Resolução Conama nº 357/2005.

A energia de retenção dos cátions trocáveis Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ nos colóides do solo segue a série liotrófica, resultando na maior lixiviação de K. A movimentação de K no perfil do solo está relacionada com seu teor inicial (WERLE et al., 2008), resultante da adubação potássica

mineral ou da disposição de resíduos, como a vinhaça. Gonzalo et al. (2006) estudaram áreas de Latossolo Vermelho Eutrófico intensamente cultivadas com cana-de-açúcar e fertirrigadas com vinhaça por dez anos consecutivos. Amostras de solo sob canais de escoamento de vinhaça não revestidos também foram avaliadas, em virtude da alta suscetibilidade de contaminação por percolação (mais de 90% dos casos), com riscos à potabilidade das águas subterrâneas (LUDOVICE, 1997). O somatório dos teores de K na camada de 0,0 m–1,0 m das áreas fertirrigadas com vinhaça variou de 385 kg a 2.369 kg de K₂O, sendo de 2 a 19 vezes superiores aos teores observados nas áreas sem vinhaça, confirmando o potencial de aporte de K. Os resultados do segundo período de amostragem, feito após nove meses, mostraram que houve intensa lixiviação de K, em virtude da diminuição de seus teores na camada de 0,0 m–0,6 m. Da quantidade média de vinhaça aplicada, cerca de 1.270 kg ha⁻¹ de K₂O foram lixiviados da camada até 1 m de profundidade, o suficiente para adubação de sete ciclos da cultura. Independentemente da profundidade, a porcentagem de saturação da CTC com K ultrapassou a recomendação de 5%, variando de 10%–15%, na primeira amostragem, e de 6%–11%, na segunda avaliação. Sob o canal de vinhaça, obteve-se um somatório de 9.830 kg ha⁻¹ de K₂O na camada 0,0 m–1,0 m de profundidade, na primeira avaliação. Somente na camada 0,8 m–1,0 m, os teores de K₂O alcançaram 2.632 kg ha⁻¹, indicando a intensa lixiviação de K e a necessidade de revestimento dos canais. Após nove meses, os teores de K₂O na camada 0,0 m–1,0 m passaram de 9.830 kg ha⁻¹ para 4.600 kg ha⁻¹, apontando movimentação de 53% do K, ou de 5,5 t ha⁻¹ de K₂O, para fora da zona de influência das raízes, em direção às águas subterrâneas.

Normalmente, não se associam problemas ambientais ou de saúde pública com o excesso de K. Porém, o aumento dos níveis de K no sangue ($\geq 5,5$ mmol L⁻¹) causa uma patologia denominada hipercalemia ou hiperpotassemia. Alterações significativas na concentração extracelular de potássio trazem implicações metabólicas, incluindo ao sistema nervoso, com repercussões na musculatura e no coração, que se manifestam pela fraqueza muscular, arritmias e bloqueios cardíacos. Por causa da grande capacidade dos rins em aumentar a excreção urinária de potássio frente a sobrecargas, pode-se dizer que a hipercalemia ocorre por ingestão de K em excesso somente se associada à uma séria disfunção renal (ROCHA, 2009).

Existem divergências na literatura científica sobre o potencial de contaminação de águas subterrâneas pela lixiviação de nitrato proveniente de aplicações de vinhaça no solo. Orlando Filho et al. (1995) avaliaram a lixiviação de nitrogênio ao longo do perfil de um Neossolo Quartzarênico sob adubação mineral e aplicação de vinhaça ($0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Concluíram que, no período de 25 semanas após a aplicação da vinhaça, não houve percolação de NO_3^- e de NH_4^+ até 2 m de profundidade, mesmo se tratando de um solo muito arenoso. Ludovice (1997) concluiu que houve infiltração da vinhaça sob canais condutores, alterando os valores de pH, CE, DBO, N-NH_4^+ , N-NO_3^- e N-NO_2^- das águas subterrâneas. Após avaliações de 5, 10 e 15 anos de aplicações de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de vinhaça, Cruz et al. (1990) encontraram N-nitrato em água subterrânea abaixo do limite prejudicial à saúde humana.

A adsorção do ânion NO_3^- pelo solo normalmente é baixa por causa da sua repulsão pelas cargas negativas da superfície dos coloides. Isso é particularmente verdadeiro nos horizontes superficiais, onde ocorre maior expressão da capacidade de troca de cátions da matéria orgânica (SOARES; ALLEONI, 2008). Há, no entanto, expectativa de que o NO_3^- seja retido ao se aprofundar no perfil do solo, pois, na ausência da matéria orgânica, a capacidade de troca de ânions (CTA) predomina, principalmente em solos intemperizados com cargas variáveis, como os Latossolos (OLIVEIRA et al., 2000). Entretanto, a manutenção de elevados teores de K na solução do solo, promovida pela aplicação de vinhaça, facilita a formação de complexos entre o K^+ e o NO_3^- (ROSSETTO et al., 2010a, 2010b). A provável formação da espécie neutra de KNO_3^0 vai reduzir significativamente a possibilidade de retenção do NO_3^- , mesmo nas camadas mais profundas do solo. O resultado é a mobilidade facilitada do NO_3^- , com sérios riscos de contaminação de águas subterrâneas.

O risco de lixiviação de Ca, Mg, K e NO_3^- é maior quando a vinhaça é aplicada em solos rasos e/ou arenosos, no final da safra ou próximo do início da estação de chuvas. Nessas condições, a velocidade de movimentação dos íons pode não ser compatível com a capacidade de absorção da planta. Aliás, é muito provável que esses elementos transponham a zona de influência das raízes com certa facilidade, uma vez que Koffler (1986) considerou que a profundidade média do sistema radicular da cana-de-açúcar cultivada no Brasil é de 60 cm, muito aquém dos 120 cm–200 cm normalmente alcançados em outros países. Se a profundidade efetiva for considerada, ou seja, a região onde se encontram cerca

de 80% do total de raízes finas das culturas, as chances de absorção dos elementos lixiviáveis diminuem sensivelmente. As camadas de compactação são impedimentos físicos que limitam o aprofundamento radicular. No entanto, as barreiras químicas, como o excesso de alumínio trocável em subsuperfície, são as causas mais frequentes do reduzido crescimento das raízes. Oliveira (2012) concluiu que as variedades de cana-de-açúcar diferem quanto à tolerância ao Al fitotóxico. O uso de variedades mais tolerantes pode garantir maior volume de raízes, ampliando a zona de influência radicular e a capacidade de absorção dos elementos que estão lixiviando por consequência da aplicação de vinhaça. Ademais, a vinhaça auxiliará na construção de um ambiente subsuperficial mais propício para as variedades sensíveis ao Al, em vista da capacidade dos ácidos orgânicos e da fração coloidal em neutralizá-lo.

Tecnicamente, existe diferenciação entre lençol freático e aquífero, embora ambos contenham água subterrânea. A água retida no espaço poroso do solo e que, sazonalmente, tem seu nível alterado constitui o lençol freático. Já o material geológico, localizado em grandes profundidades e que normalmente representa a rocha de origem do solo, é denominado aquífero pela capacidade de atuar como depósito de água. A grande maioria dos estudos aborda a influência da disposição da vinhaça sobre a água subterrânea mais próxima da superfície e que, por essa razão, tem suas propriedades mais facilmente alteradas pelo manejo do solo. Hassuda et al. (1990) desenvolveram estudo em antiga área de sacrifício. A zona de infiltração recebeu, aproximadamente, $348.000 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ de vinhaça, durante um período de dez anos. A transferência de material da vinhaça para a água subterrânea do Aquífero Bauru foi primeiramente identificada pelos valores de condutividade elétrica, que variaram de $80\text{--}1.800 \mu\text{S cm}^{-1}$ e foram considerados altos quando comparados aos da água subterrânea fora da zona de infiltração ($10\text{--}55 \mu\text{S cm}^{-1}$).

As altas concentrações dos íons bicarbonato, cloreto, cálcio, magnésio e potássio conferiram forte caráter condutor às águas subterrâneas. O nitrogênio da vinhaça encontra-se predominantemente na forma orgânica que, na zona saturada, é transformado nos ânions nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-), cátion amônio (NH_4^+) e fases gasosas de nitrogênio molecular (N_2) e amônia (NH_3). Segundo Hassuda et al. (1990), somente as concentrações do íon NH_4^+ ultrapassaram os padrões de potabilidade da água subterrânea. Assim, a infiltração da vinhaça teve como impacto mais importante a transferência de NH_4^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ para a água

subterrânea. Gloeden et al. (1990) estudaram os elementos químicos que compõem a vinhaça quanto ao seu comportamento nas zonas insaturadas e saturadas de solos sobre o Aquífero Botucatu, atualmente chamado Aquífero Guarani. Comprovaram que após a aplicação de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça, pode haver risco de violação da qualidade das águas subterrâneas pelo aumento das concentrações de cloreto, carbono e nitrogênio orgânicos e amônio. Os teores de potássio e de nitrato não apresentaram alterações na zona saturada. Cunha et al. (1987) concluíram que o risco de o potássio e o nitrogênio lixiviarem da camada até 1,20 m do solo e atingirem as águas subterrâneas é muito pequeno.

A Cetesb tem identificado evolução da concentração de compostos nitrogenados nas águas dos poços de monitoramento de aquíferos, o que inclui o N-nitrato (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2010). No período de 2001 a 2003, foram identificados 11 pontos de monitoramento com nitrato em concentrações acima de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ de N-NO_3^- , apontando assim indícios de poluição antrópica. Já no período de 2004 a 2006, identificaram-se 29 pontos nessa condição. Além do aumento do número de pontos com nitrato acima de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$, houve também nítida tendência de aumento das concentrações ao longo do tempo.

No último relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2010), relativo ao período de 2007 a 2009, a Rede de Monitoramento de Qualidade das Águas Subterrâneas da Cetesb avaliou 175 pontos, em 151 municípios e em sete aquíferos do Estado de São Paulo, caracterizando a qualidade das águas subterrâneas pela análise de mais de 40 parâmetros. Do total de poços de monitoramento, 61 estavam no Aquífero Bauru e 41 no Guarani, os dois mais importantes aquíferos do estado. A concentração de nitrato ultrapassou valores de intervenção e de prevenção (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2001) em 16% e em 46% dos poços, respectivamente (Tabela 11).

O Aquífero Bauru está sob mais do que 40% da superfície do Estado de São Paulo, sendo extremamente suscetível à contaminação por lixiviação em virtude da sua natureza granular sedimentar. Já o Aquífero Guarani é o maior manancial de água doce subterrânea transfronteiriço do mundo e ocorre em 76% do território do Estado de São Paulo. O Aquífero Bauru apresenta a situação mais preocupante, pois possui grande área de afloramento e de recarga e é largamente utilizado para abastecimento público da região oeste do Estado de São Paulo.

Tabela 11. Alguns parâmetros químicos da vinhaça e sua concentração nas águas subterrâneas dos aquíferos Bauru e Guarani, conforme síntese de resultados de qualidade do período de 2007 a 2009.

Parâmetro	Unidade	VMP ¹	Aquífero Bauru			Aquífero Guarani			Vinhaça ²
			Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	
pH		6,0-9,5	5,0	10,0	7,0	4,4	10,3	6,5	4,2
Cálcio	$\text{mg L}^{-1} \text{ Ca}$	-	0,7	82,8	18,0	<0,05	41,3	8,8	368
Cloreto	$\text{mg L}^{-1} \text{ Cl}$	250	<0,1	39,0	2,5	0,1	20,0	<1,2	1.219
Magnésio	$\text{mg L}^{-1} \text{ Mg}$	-	<0,01	24,0	5,2	<0,02	5,6	1,8	136
N-nitrato	$\text{mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3^-$	10	<0,1	20,0	2,1	<0,1	13,7	<0,2	<0,8
Potássio	$\text{mg L}^{-1} \text{ K}$	-	0,05	9,7	3,2	0,01	8,3	2,7	1.689
Sódio	$\text{mg L}^{-1} \text{ Na}$	200	0,37	64,6	7,3	<0,03	110,0	2,8	52
Sulfato	$\text{mg L}^{-1} \text{ SO}_4^{2-}$	250	<1	12,4	2,7	<1	<10,0	<10,0	1.537

Fonte: (1) Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2001) e (2) Elia Neto e Nakahodo (1995).

Essas desconformidades foram atribuídas não somente à deficiência dos sistemas de tratamento de esgotos, mas também à disposição de resíduos. Normalmente atribui-se o aumento das concentrações de nitrato nas águas subterrâneas às limitações de coleta e tratamento de esgoto. Atualmente, o Estado de São Paulo vem registrando aumento das redes de coleta e de tratamento de esgoto em seus municípios, mas a avaliação da evolução das concentrações dos compostos nitrogenados nos poços monitorados pela Cetesb mostra aumento desses contaminantes nos aquíferos, sugerindo que a contaminação por nitrato pode vir a decorrer de outras fontes. Apesar da origem não comprovada, a suspeita recai sobre a vinhaça.

Por exemplo, na Bacia no Alto do Paranapanema – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI 22) –, a coleta de esgoto está em 97,5% e o tratamento é de 89,1%. Ainda assim, foram registrados níveis elevados de nitrato, com base nos resultados coletados pela Cetesb nos cinco pontos de amostragem em uma área de 12.395 km^2 , dos quais quatro estão localizados no importante Aquífero Bauru. Destaca-se que a região tem sua base econômica em atividades de usinas de açúcar e álcool, frigoríficos e abatedouros, que passaram a constituir fontes importantes de nitrato. Segundo Hassuda (1989), cerca de 97% das usinas e destilarias do Estado de São Paulo encontram-se sobre três domínios geológicos, que

constituem os principais sistemas aquíferos do Estado de São Paulo: 43% sobre o domínio do Grupo Bauru, 25% sobre o domínio da Formação Serra Geral e 29% sobre a Formação Botucatu.

VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA

Segundo Cantarella (2007), cerca de 54 milhões de t ano⁻¹ de N são emitidas para a atmosfera na forma de amônia (NH₃), das quais 75% são provocadas por atividades antrópicas. As perdas por volatilização de amônia em solos estão associadas predominantemente às alterações do pH (NH₄⁺ ↔ NH₃ + H⁺) e à fonte nitrogenada usada nas adubações. Em condições de pH 5,2, a forma NH₃ pode representar apenas 0,01% do N amoniacal, com aumento de 100 vezes quando o pH sobe para 7,2. Solos alcalinos e solos inundados representam condições mais sujeitas a perdas de N por volatilização. O uso de fertilizantes amoniacais de reação neutra ou ácida, tais como o sulfato ou o nitrato de amônio, reduz ou até elimina perdas de NH₃ em solos ácidos, mas tem menos economicidade. Há importante liberação de N amoniacal a partir da ureia, por causa das reações de hidrólise enzimática. Isso ocorre mesmo em solos ácidos, pois a reação consome íons H⁺ e provoca a elevação do pH ao redor dos grânulos, podendo mudar o pH de 6,5 para 8,8 em três dias após a adubação (CANTARELLA, 2007). No Brasil, perdas de 20%–50% de N por volatilização têm sido relatadas quando a ureia é aplicada na superfície de solos cultivados com cana-de-açúcar, sobretudo nas soqueiras, em que a incorporação do fertilizante é mais dificultada (TRIVELIN et al., 2002).

No solo, a enzima urease hidrolisa a ureia [CO(NH₂)₂] à carbonato de amônio [(NH₄)₂CO₃], que, em seguida, desdobra-se em amônia (NH₃), gás carbônico e água (SENGIK et al., 2001). A atividade da urease pode ser 30 vezes maior em resíduos vegetais do que em solos (CANTARELLA, 2007), dependendo também da presença de umidade, de altas temperaturas e da exposição ao vento. A palhada remanescente da colheita da cana crua também apresenta a enzima urease, que inicia a reação de perda da ureia por volatilização, por facilitar sua hidrólise. Sengik et al. (2001) constataram que a vinhaça apresenta baixa atividade de urease, provavelmente em razão de as altas temperaturas a que é submetida na usina (80 °C–100 °C) ocasionarem sua esterilização, visto que a inativação da urease pode ocorrer com temperaturas acima de 60 °C. Aparentemente, essa seria uma característica vantajosa da vinhaça, ou seja, os baixos aporte

e atividade da urease tenderiam a proporcionar menor intensidade de hidrólise da ureia. Porém, Sengik et al. (2001) observaram que as perdas de amônia por amostras de um Nitossolo Vermelho Eutrófico adubadas com ureia foram favorecidas com a adição de vinhaça. Apesar de a vinhaça não portar urease ativa, o material orgânico coloidal e facilmente decomponível de sua constituição é meio adequado e fonte imediata de energia para o aumento da população microbiana (NEVES et al., 1983), que passa a produzir urease rapidamente e leva a maiores perdas de amônia.

Atualmente, também se consideram perdas importantes por volatilização de N via foliar (CANTARELLA, 2007). Condições de estresse térmico ou hídrico, assim como a fase de senescência das folhas, contribuem para o aumento da concentração de formas amoniacais no interior das plantas, por causa da queda na atividade da glutamina sintetase e da glutamato sintase, enzimas responsáveis pela assimilação da amônia no metabolismo vegetal do N. Com isso, ocorrem perdas significativas de NH₃ na corrente respiratória. Trivelin et al. (2002) registraram perdas de 19% de N-ureia, mesmo com aplicação em profundidade. Isso foi atribuído à liberação de amônia pela parte aérea de cana-soca, que pode significar 90 kg ha⁻¹ de N.

No Estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar do País, a Lei nº 11.241 de 2002 (SÃO PAULO, 2002) prevê que o atual sistema de colheita da cana-de-açúcar, com prévia despalha a fogo, seja completamente substituído pela colheita mecanizada da cana crua. A mudança, em detrimento das vantagens que trará, dificultará a incorporação de fertilizantes, uma vez que uma camada de restos vegetais, composta por 8 t ha⁻¹ a 12 t ha⁻¹ de palha, deverá ser formada sobre o solo. Isso é particularmente preocupante para o manejo da ureia, fonte nitrogenada mais utilizada na cultura da cana-de-açúcar. Wood (1991) observou perdas de N por volatilização que atingiram níveis entre 50% e 94% quando a ureia foi aplicada superficialmente em solos cobertos pela palhada. A maneira mais eficiente de reduzir ou de eliminar as perdas por volatilização é a incorporação da ureia ao solo (CANTARELLA, 2007). Uma das opções é colocá-la a 5 cm ou 10 cm de profundidade. Essa operação é mais difícil em áreas de colheita de cana crua, onde é necessário o uso de implementos com discos de corte acoplados, capazes de cortar a palhada, dispor o fertilizante no interior do solo e reduzir as perdas por volatilização a níveis menores do que 5%. A outra opção é o contato da ureia com 10 mm a 20 mm de chuva ou irrigação, o que, graças à sua alta solubilidade, é

suficiente para que ela penetre no solo (CANTARELLA, 2007). Por essa estratégia, o fenômeno da volatilização de N da ureia pode ser parcialmente controlado pela fertirrigação com a vinhaça, já que uma taxa volumétrica de aplicação de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ proporciona uma lâmina de água de 15 mm. Porém, trata-se de uma prática que funciona em solos descobertos, e a palhada impõe restrições na solubilização e movimentação da ureia em profundidade. O uso de inibidores de urease, como o N-(n-Butil) Tiofosfórico Triamida (NBPT), tem sido testado como amenizador das perdas de N-ureia aplicado na presença de palhada (CANTARELLA et al., 2005). Segundo Rossetto e Dias (2005), resultados de 12 ensaios de campo com milho, cana-de-açúcar e pastagem indicaram que o inibidor reduziu em 50%, em média, as perdas por volatilização do N da ureia.

Perdas significativas de N por volatilização não ocorrem com o uso do nitrato ou de sulfato de amônio. Porém, assim como a ureia, são fontes nitrogenadas sujeitas a perdas por desnitrificação em situações de alta umidade e baixa aeração. A presença de compostos solúveis de carbono potencializa essa reação (CANTARELLA, 1998) e, nesse caso, a vinhaça pode contribuir para a elevação das perdas de N por desnitrificação (AMARAL SOBRINHO, 1983).

EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA

A produção de uma tonelada de fitomassa em matéria seca (MS) de cana-de-açúcar fixa, no mínimo, 0,42 t em carbono (C), o que corresponde a mitigar 1,54 t de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera (PAULA et al., 2010). Garcia e Sperling (2010) concluíram que a maior parte da emissão de gases de efeito estufa (GEE) durante a exploração da cana-de-açúcar e produção do etanol ocorre durante a queima do canavial e do palhicho, seguida pelo uso de combustíveis fósseis no processo produtivo e pelo uso de fertilizantes nitrogenados. Normalmente, a emissão de GEE pelo manejo da vinhaça é abordada mais na forma de consumo de combustível usado na operação de transporte e aplicação do subproduto, de forma direta com caminhões-tanque ou caminhões-tanque e canais associados a conjuntos moto-bombas, do que propriamente pela contribuição direta da vinhaça (GARCIA; SPERLING, 2010).

Porém, recentemente, Oliveira (2010) conduziu estudo de emissão de GEE provenientes da vinhaça no canal de irrigação e após sua aplicação ao solo por fertirrigação. Apesar de as emissões terem variado com

as propriedades físico-químicas da vinhaça, observou-se que o resíduo não tem potencial para a formação de $\text{N-N}_2\text{O}$, enquanto o C-CO_2 não foi computado no cálculo das emissões totais em razão da reassimilação pela fotossíntese. A conversão de $\text{N-N}_2\text{O}$ e de C-CH_4 em CO_2 eq. apontou que o C-CH_4 contribuiu com 99% das emissões totais da vinhaça do canal de distribuição. A distribuição por fertirrigação aumentou as emissões de C-CO_2 e de $\text{N-N}_2\text{O}$, mas não afetou a de C-CH_4 . O estudo ainda mostrou que as emissões de $\text{N-N}_2\text{O}$ provenientes da aplicação de N na forma de vinhaça resultaram em fatores de emissão de 0,68% e de 0,44% ($\text{kg N-N}_2\text{O} / \text{kg N}$), respectivamente para cana-de-açúcar colhida com queima e sem despalha a fogo. O resultado parece consistente com a concentração das diferentes formas de N obtida pela análise da série nitrogenada da vinhaça, em que, para a concentração média de 356 mg L^{-1} de N total, tem-se 11 mg L^{-1} de N amoniacal (ROSSETTO et al., 2010a). Na contabilização das emissões totais de GEE, Oliveira (2010) indicou que 90% das emissões resultaram do canal de distribuição e que a vinhaça emitiu em média, para os dois sistemas de colheita, $490 \text{ kg de CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1}$ após aplicação de $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. O impacto pode ser mitigado pela opção de erradicar a colheita com queima. Segundo Paula et al. (2010), com a colheita mecanizada deixa-se de emitir cerca de $13 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2 eq. de outros GEE que, somados às possíveis $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C fixadas na fitomassa, geram um ativo ambiental de mais de $60 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2 eq.

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELA APLICAÇÃO DA VINHAÇA

A projeção definitiva do bicomcombustível brasileiro depende de medidas mitigadoras dos impactos ambientais de sua produção, atendendo ao brado mundial: "os biocombustíveis são uma alternativa para as clássicas fontes fósseis de energia, mas apenas se forem produzidos de maneira sustentável" (MERKEL, 2008 citado por MERKEL..., 2008). Os impactos negativos estão relacionados a monocultivo, desmatamento, degradação do solo (compactação, erosão, perda de fertilidade), uso de defensivos, contaminação do solo e da água pelo uso inadequado de resíduos, queimadas e qualidade do ar atmosférico e uso da água. Por outro lado, a cadeia de produção da cana-de-açúcar contribui para a qualidade ambiental, à medida que (i) o etanol substitui os combustíveis fósseis e o chumbo tetraetila adicionado à gasolina, diminuindo a produção de GEE; (ii) há

baixo uso de insumos agrícolas no cultivo na cana-de-açúcar (0,43 t ha⁻¹ de fertilizantes), principalmente por causa da utilização de resíduos industriais da produção do etanol e açúcar, como a vinhaça e a torta de filtro; (iii) opera a reciclagem de nutrientes e de matéria orgânica, resultando em balanço favorável entre a geração e a reutilização de resíduos.

É notório o esforço e o crescimento da consciência do setor sucroenergético para atender aos princípios da sustentabilidade. Entre as medidas, destacam-se o aprimoramento da legislação correlata, o melhoramento genético da cana-de-açúcar e a criação de novas alternativas de minimização e de uso de resíduos.

LEGISLAÇÃO

Houve evolução dos dispositivos legais para contornar os impactos da disposição da vinhaça no ambiente. Com a criação do Conselho Nacional de Controle de Poluição Ambiental, pelo Decreto-Lei nº 303 de 28 de fevereiro de 1967 (BRASIL, 1967), o lançamento de resíduos líquidos ou sólidos em águas receptoras só era permitido se não as tornassem poluídas. Provavelmente pela ausência de meios de comprovar seu efeito poluidor, associada à falta de clareza de lei, o Ministério do Interior, pela portaria Minter nº 323, de 29 de novembro de 1978 (BRASIL, 1978), proibiu, a partir do ano-safra 1979/1980, o despejo do vinhoto produzido pelas destilarias de álcool em coleção hídrica. Mais tarde, a portaria Minter nº 158, de 3 de novembro de 1980 (BRASIL, 1980), estendeu a proibição para as usinas produtoras de açúcar. Novos progressos na legislação ambiental foram alcançados com a resolução Conama nº 01/1986 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986), com a imposição da elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA), acompanhado pelo Relatório de Impacto Ambiental (Rima) para a obtenção de licença para atividades com potencial para alterar o meio ambiente. A proteção das águas subterrâneas por mecanismos legais iniciou em 1988, com a Resolução Conama nº 396/1988.

No Estado de São Paulo, vigora a Norma Técnica P4.231 – Vinhaça: critérios e procedimentos para a aplicação no solo agrícola (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2006), originada da Câmara Ambiental do Setor Sucroalcooleiro e homologada pela Cetesb/SMA por meio da Decisão da Diretoria nº 35, de 9 de março de 2005. Considerada avançada e única no Brasil, a norma estabelece os critérios e os procedimentos para o armazenamento, transporte e destinação da

vinhaça por fertirrigação em solo agrícola. A “nova Cetesb”, que desde 2009 ganhou a denominação Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, orienta para a consulta do material que subsidiou a elaboração da norma, composto por leis federais e estaduais, normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e guias, manuais, normatizações, decisões e portarias publicadas pela Cetesb. Dispõe sobre a amostragem e sobre os parâmetros do solo, da vinhaça e da água dos poços de monitoramento que devem ser analisados para atender à legislação pertinente, bem como instrui sobre a elaboração do Plano de Aplicação de Vinhaça, que será utilizado pela Cetesb para fins de acompanhamento e fiscalização. Como instrumento de gestão ambiental de grande avanço, a P4.231 também racionaliza a dosagem para a boa prática da disposição de vinhaça em solo agrícola, por meio da equação:

$$\text{Quantidade de vinhaça (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)} = \frac{[(0,05 \times CTC_t - K_{\text{solo}}) \times 3.744 + 185]}{K_{\text{vinhaça}}} \quad (1)$$

em que

0,05 = 5% da CTC_t, ou seja, proporção máxima da capacidade de troca de cátions total do solo que pode estar ocupada pelo potássio (K).

CTC_t = capacidade de troca de cátions total do solo, expressa em cmol_c dm⁻³, obtida pela análise de solos para fins de fertilidade, realizada por laboratório de análise de solo que utiliza metodologia adotada pelo Instituto Agrônômico de Campinas (IAC) e devidamente assinada por responsável técnico.

K_{solo} = teor de potássio (K) do solo, expresso em cmol_c dm⁻³, a profundidade de 0,00 m a 0,80 m, obtida pela análise de solos para fins de fertilidade, realizada por laboratório de análise de solo que utiliza metodologia adotada pelo IAC devidamente assinada por responsável técnico.

3.744 = constante que converte os resultados da análise de solo para fins de fertilidade, expressos em cmol_c dm⁻³, para kg de potássio (K) por volume de solo contido em um hectare a 0,80 m de profundidade.

185 = quantidade de K₂O, em kg, extraída pela cultura da cana-de-açúcar, por corte.

K_{vinhaça} = teor de potássio (K) da vinhaça, expresso em kg de K₂O m⁻³, apresentado em boletim analítico assinado por responsável técnico.

Maiores dosagens de vinhaça só são permitidas pela P4.231 se a saturação da CTC do solo pelo potássio não estiver acima de 5%. Quando

esse limite for atingido, a aplicação ficará restrita à reposição do nutriente em função da extração pela cultura da cana-de-açúcar, que é, em média, de 185 kg ha^{-1} de K_2O por corte. Em razão das variações dos teores de K, a análise do teor de K_2O na vinhaça, em kg m^{-3} , deve ser realizada com periodicidade semanal e o resultado deve ser empregado no cálculo da dosagem de vinhaça a ser aplicada por fertirrigação, em $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$, em conformidade à norma P4.231.

O relatório de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2001), atualizado em 2005 por meio da Decisão de Diretoria da Cetesb nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005, e a portaria Cetesb CTSA-01, de 28 de novembro de 2005, que dispõe sobre os prazos e procedimentos para impermeabilização de tanques de armazenamento de vinhaça e de canais mestres ou primários, constituem dispositivos da legislação estadual que são considerados na Norma P4.231.

Existem indicações evidentes da presença de íons da vinhaça nas águas subterrâneas, mas há expectativa de que as dosagens atualmente praticadas em virtude da normatização, associadas à manutenção da palhada pela colheita da cana crua, tornem remotas as possibilidades de violação da qualidade das águas ou, pelo menos, que as restrinjam a condições específicas de solos arenosos, rasos ou remanescentes das épocas desregradadas. O respeito às diretrizes em vigor, que tendem a ser cada vez mais aprimoradas tecnicamente, pode garantir que a poluição das águas subterrâneas seja um evento a ser considerado em longo prazo. Isso já é razão suficiente para que a cautela no uso da vinhaça seja mantida ou ampliada.

ALTERNATIVAS PARA USO E TRATAMENTO DA VINHAÇA

Ao considerar a produção de 286,8 bilhões de litros de vinhaça projetada para o ano-safra 2012/2013 e 100% de sua disposição por fertirrigação à taxa de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, serão necessários 1.912.000 ha de área cultivada com cana-de-açúcar. Estima-se que a área ocupada com cana-de-açúcar no Brasil seja de 8.567.200 ha, ou seja, há excedente de superfície para receber vinhaça por fertirrigação. Logo, qual será a razão da preocupação com a destinação da vinhaça? Por que a vinhaça é tratada como problema se há benefícios com sua aplicação para fins agrícolas?

Algumas das implicações da Norma Técnica P4.231 se relacionam com a disposição vedada da vinhaça em áreas de sacrifício e em altas

doses por fertirrigação. Com isso, o setor sucroalcooleiro enfrenta dificuldades com o aumento das restrições de disposição da vinhaça em áreas agrícolas e já se organizou para viabilizar seu transporte para áreas mais distantes da unidade produtora ou para a adoção de técnicas inovadoras para seu tratamento.

Existe uma distância econômica para transporte e aplicação da vinhaça, acima da qual os custos são maiores do que a adubação mineral convencional. Sua variação ocorre em função da topografia da área, do projeto de irrigação, da concentração de K na vinhaça e, principalmente, dos custos do fertilizante mineral. Para o sistema típico de transporte com rodotrem e aplicação por canhão aspersor, essa distância era de 12 km. Mais recentemente, com a alta dos preços dos fertilizantes, estima-se que ainda compensa percorrer a distância de 38 km, o que traz vantagens como a implantação direta e rápida da fertirrigação, a facilidade de atingir áreas não contíguas e a melhor distribuição da vinhaça (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009).

Mesmo assim, os impasses para o uso da vinhaça na fertirrigação obrigam a busca de novas alternativas de uso e de tratamento da vinhaça. Em vista do alto custo normalmente envolvido na implementação dessas estratégias inovadoras, é interessante que elas ofereçam algum atrativo, como a adição de valor agregado e geração de novos subprodutos com valor econômico. Algumas opções foram preconizadas na época do auge do Proálcool (CAMHI, 1979; ORLANDO FILHO et al., 1983a), tais como a concentração da vinhaça por evaporação com finalidade de fertirrigação e de produção de ração animal e fertilizantes, a fermentação aeróbia por microrganismos para a produção de proteínas unicelulares, a fermentação anaeróbia usando bactérias metanogênicas para a produção de biogás e a recuperação dos sais de potássio pela combustão ou incineração da vinhaça.

Tecnologias mais recentes baseiam-se nos avanços da área de biotecnologia (ROBLES-GONZÁLEZ et al., 2012). As opções de tratamento biológico da vinhaça baseiam-se na digestão anaeróbia, usando o reator anaeróbio de leito fluidizado, o reator anaeróbio de fluxo ascendente (Rafa), ou *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (Uasb), o filtro anaeróbio e a ozonização combinada com digestão anaeróbia, ou na digestão aeróbia, pelo emprego de consórcio ou de culturas puras de bactérias, do tratamento com fungos e da compostagem com resíduos sólidos orgânicos. Opções de tratamento físico-químico empregam a injeção de ozônio e a oxidação com reagente de Fenton, com características desejáveis no pré e pós-tratamento de efluentes industriais contendo compostos recalcitrantes.

CONCENTRAÇÃO DA VINHAÇA

A opção mais viável para a aplicação da vinhaça em áreas mais afastadas é a sua concentração, ou seja, a eliminação do excesso de água da sua composição por evaporação, otimizando o transporte e permitindo atender a áreas não contíguas onde a fertirrigação por dutoviário é impraticável. A viabilidade dessa alternativa pode ser ampliada na medida em que ela seja empregada apenas no volume de vinhaça a ser aplicada nas áreas que ultrapassam a distância máxima econômica. No Brasil, as poucas unidades produtoras que adotam esse processo o aplicam em 5% do total de vinhaça produzida, concentrando o resíduo a 40%. A tecnologia acoplada ao novo conceito de usinas autossuficientes tem conseguido um teor de sólidos de 65% na vinhaça.

A água evaporada tem sido usada como água de reuso, produzida na taxa de 300.000 L a cada mil toneladas de cana-de-açúcar processada. A vinhaça concentrada, além do seu tradicional uso na fertirrigação, tem resultado em 4,7 kg de biofertilizante organomineral para cada tonelada de cana-de-açúcar (FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2008). Rossetto et al. (2010b) informaram sobre a possibilidade de produção de 3,3 m³ de vinhaça concentrada por hora, alcançada por uma unidade concentradora de uma usina no ano-safra 2005/2006, permitindo a sua disposição em aproximadamente 5.000 ha. Orlando Filho et al. (1983a) relataram excelentes resultados com o uso de 4 m³ ha⁻¹ da vinhaça concentrada em cana-planta e em soqueiras. Para a secagem térmica da vinhaça estima-se consumo de energia elétrica equivalente a queima de 30% do bagaço produzido na usina. Outras pesquisas vêm sendo desenvolvidas com foco no aproveitamento de alguns constituintes da vinhaça, tais como a glicerina, o ácido succínico e o inositol, um importante composto do complexo vitamínico B, com várias aplicações nas indústrias alimentícia, farmacêutica e veterinária, entre outras (SZMRESCANYI; GONÇALVES, 2009).

PROCESSOS INOVADORES DA BIODIGESTÃO DA VINHAÇA

A digestão anaeróbia tem sido um sistema bastante empregado para o tratamento de vinhaça, em vista do baixo custo operacional e da baixa produção de lodo (JIMENEZ et al., 2006). Normalmente é conduzida em reatores Uasb para produção de biogás rico em metano. Opera por fluxo ascendente e aceita altas taxas de carga orgânica, operando em condições

mesofílica ou termofílica. Por esse tratamento, há possibilidade de remoção de 80%–90% da DBO. Porém, o padrão para lançamento não é atingido, por causa da carga poluidora ainda remanescente, composta por uma fração importante de compostos recalcitrantes (melanoidinas). O efluente gerado deve ser submetido a tratamentos em série até o nível terciário, com uso de processos de oxidação (ozônio ou Fenton). Esse tratamento complementar é pouco praticado em virtude da inviabilidade econômica. Somente a matéria orgânica é degradada e o efluente final mantém suas características nutricionais para a fertirrigação da cultura da cana-de-açúcar. A partir da produção de 1.000 L de etanol, gerando 12.000 L de vinhaça com 285 kg de DQO, há geração de biogás (60% de metano) em quantidade suficiente para manter o consumo mensal de energia de uma residência média. Ainda sob condições anaeróbias, os compostos orgânicos da vinhaça podem servir de substrato para microrganismos produtores de bio-hidrogênio (*Clostridium acetobutylicum* e *Clostridium pasteurianum*), importante fonte inovadora de energia (WANG; ZHAO, 2009).

O tratamento aeróbio tem sido pouco recomendado para o tratamento da vinhaça em larga escala, por causa dos seus elevados teores de matéria orgânica. Há alta demanda de energia para manter a transferência de oxigênio (ozonização aumenta a biodegradabilidade em 25 vezes), além da geração de alta quantidade de biomassa (50% de DBO é convertida em biomassa ou lodo), que pode representar enormes custos adicionais de tratamento (ROBLES-GONZÁLEZ et al., 2012). Entretanto, aplicações bem-sucedidas da via aeróbia têm sido obtidas para a remoção da cor (melanoides) e do efeito tóxico dos fenóis e dos polifenóis. A descoloração significa a retirada de compostos recalcitrantes, usando fungos com capacidade de degradar polímeros orgânicos e de adsorvê-los em seus micélios. Existem estudos conduzidos por pesquisadores brasileiros do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (Cena), da Universidade de São Paulo, que já mostraram o potencial da vinhaça em servir de substrato para o cultivo de fungos do gênero *Pleurotus*, que, por sua vez, são capazes de produzir enzimas degradadoras de corantes têxteis. A tecnologia também trata a vinhaça, que a transforma em água de reuso. O consórcio bacteriano ou culturas puras de *Pseudomonas aeruginosa*, *Stenotrophomonas matophila* e *Proteus mirabilis* podem proporcionar 67% de remoção da cor da vinhaça, em 24 horas, ou redução de 51% da sua DQO, em 72 horas (MOHANAA et al., 2007).

Microalgas são organismos heterotróficos que consomem moléculas orgânicas simples, tais como a glicose e o glicerol, presentes na vinhaça. A vinhaça foi viável como meio de cultivo de *Aphanothece microscopica* Nägeli e *Chlorella vulgaris*, com alta conversão em biomassa da *Aphanothece*. Houve remoção de 56% de glicose e de 61% de DQO pela cianobactéria, e de 84% de glicose e 25% de DQO pela *Chlorella* (BONINI, 2012). A biomassa gerada a partir do consumo da vinhaça consegue acumular teores de lipídeos que podem atingir 30%, ante 18% da soja. A extração dos lipídeos é feita por ultracentrifugação e a produtividade do óleo pode alcançar 40 t ha⁻¹, enquanto a soja produz 3 t ha⁻¹. O óleo é transesterificado para a fabricação do biodiesel (FAPESP, 2011). O maior acúmulo de lipídeos foi obtido nos cultivos de microalgas com glicerol (BONINI, 2012), um importante componente orgânico da vinhaça (Tabela 1).

Outra útil aplicação dos processos aeróbios é na produção de fontes alternativas de proteínas, em que a biomassa microbiana de bactérias, fungos e algas pode ser usada como fonte de proteína unicelular para alimentação animal. Em escala laboratorial, já foram obtidas biomassas microbianas com teor de proteína bruta entre 18% e 27% a partir de seu cultivo em vinhaça, com eficiência de remoção de DQO e de DBO da ordem de 65% e 95%, respectivamente (ROBLES-GONZÁLEZ et al., 2012). Nitayavardhana e Khanal (2010) cultivaram *Rhizopus microsporus* em vinhaça suplementada com N e P e obtiveram biomassa com 46% de proteína bruta.

A compostagem é um processo aeróbio por excelência, normalmente usado na transformação de resíduos sólidos. A compostagem combinada de resíduos sólidos com a vinhaça, embora atraente e viável, não é praticada com frequência. Entretanto, pode constituir tecnologia de baixo custo e de ampla difusão em pequenas, médias e grandes propriedades rurais, onde tecnologias mais sofisticadas são de difícil adoção.

INovações Tecnológicas da Produção do Etanol

O setor agroindustrial também tem possibilidade de reduzir o volume de vinhaça produzida, por meio das seguintes alternativas tecnológicas (ELIA NETO et al., 2009): i) aquecimento indireto do vapor da coluna, que permite recuperar o condensado para a caldeira em vez de

incorporá-lo à vinhaça; ii) manter o Brix do mosto em torno de 20° com a pré-concentração do caldo ou com a mistura de méis, possibilitando fermentação com maior teor alcoólico; iii) recirculação de parte da vinhaça com pré-tratamento (ultrafiltração, osmose reversa), reaproveitando água e concentrando a vinhaça; iv) melhoramento genético buscando leveduras que sobrevivam a altos teores alcoólicos; v) controle efetivo da contaminação da população de leveduras com outros microrganismos. A viabilidade do fermento aumenta quando a temperatura de trabalho das dornas está abaixo de 33 °C. O uso de água gelada para resfriar as dornas pode favorecer a fermentação, com a temperatura controlada e o desenvolvimento de cepas que suportem maiores teores alcoólicos na fermentação, reduzindo o volume de vinhaça produzida.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo da história da produção de cana-de-açúcar no Brasil, a vinhaça passou da condição de resíduo para subproduto, sendo suas possibilidades de uso vistas atualmente como tecnologias importantes para o setor sucroalcooleiro. O solo tem sido o principal meio para a eliminação do efeito poluidor da vinhaça, com resultados que demonstram a melhoria de suas qualidades químicas, físicas e microbiológicas. Também se evidencia o seu elevado potencial como fornecedora de nutrientes, com sua aplicação alicerçada em critérios agrônômicos e ambientais, podendo suprir parcialmente, ou mesmo totalmente, a adubação mineral da cultura da cana-de-açúcar, assim como de outras culturas, contribuindo para a reciclagem de nutrientes. Não obstante os dados demonstrem a supremacia dos benefícios da utilização da vinhaça, também são apontados os impactos ambientais que podem ocorrer quando a normatização técnica da quantidade a ser aplicada, como aquela existente para o Estado de São Paulo, não é seguida. Além disso, a detalhada abordagem deste capítulo mostra a necessidade do monitoramento do solo e das águas subterrâneas em longo prazo, assim como a busca por novas tecnologias, oferecendo novas alternativas para os produtores, tanto para aplicação no campo como no setor industrial. O conhecimento atual sobre os efeitos da vinhaça no solo e na planta, juntamente com as normas de aplicação e os avanços gerados pela pesquisa, tem proporcionado o suporte necessário para o sucesso na busca da sustentabilidade do setor sucroalcooleiro.

REFERÊNCIAS

- ABREU JÚNIOR, C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P. da; CARDOSO, E. J. **Tópicos em Ciência do Solo IV**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. p. 391-470.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR. CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília, DF: ANA, 2009. 288 p.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B. **Efeito da vinhaça em mistura com nitrato na dinâmica do nitrogênio em solo ácido**. Itaguaí, 1983. 95 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ANDRADE, E. M. de; AQUINO, D. N. de; CRISÓSTOMO, L. de A.; RODRIGUES, J. de O.; LOPES, F. B. Impacto da lixiviação de nitrato e cloreto no lençol freático sob condições de cultivo irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria- RS, v. 39, p. 88-95, 2009.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. Roma: FAO, 1985. 174 p. (Irrigation and Drainage Paper, 29, Rev. 1).
- AZEVEDO, D. F.; BOLSANELLO, J.; WEBER, H.; VIEIRA, J. R. Nitrogênio em cana-planta: doses e fracionamento. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooeiros do Brasil**, Piracicaba, v. 6, n. 5, p. 26-33, 1986.
- BATAGLIA, O. C.; CAMARGO, O. A.; BERTON, R. S. Emprego da vinhaça na cultura de citros. **Laranja: Revista Técnico Científico de Citricultura**, Cordeirópolis, v. 7, p. 277-290, 1986.
- BEBÉ, F. V.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, G. B.; OLIVEIRA, V. S. Avaliação de solo sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 781-787, 2009.
- BERTON, R. S.; GERALDI, R. N.; RAIJ, B. van. Resíduos da indústria alcooleira como fonte de potássio em experimento em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 1, p. 61-64, 1983.
- BONINI, M. de A. **Cultivo heterotrófico de *Aphanotheca microscopica* Nägeli e *Chlorella vulgaris* em diferentes fontes de carbono e em vinhaça**. 2012. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

- BRASIL. Decreto-lei nº 303, de 28 de fevereiro de 1967. Cria o Conselho Nacional de Controle da Poluição Ambiental e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 28 fev. 1967. Seção 1, p. 2480.
- BRASIL. Ministério do Interior. **Portaria nº 158, de 3 novembro de 1980**. Disponível em: <<http://faolex.fao.org/docs/pdf/bra14334.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2012.
- BRASIL. Ministério do Interior. **Portaria nº 323 de 29 de novembro de 1978**. Disponível em: <<http://www.ima.al.gov.br/legislacao/portarias-ministeriais/Portaria%20nb0%2053.79.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2012.
- BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. da; PEDROSA, E. M. R. Qualidade do percolato de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 318-323, 2007.
- CAMARGO, O. C. de; VALADARES, J. M. A. S.; BERTON, R. S.; TEÓFILO SOBRINHO, J.; MENK, J. R. F. **Alteração das características químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico pela aplicação de vinhaça**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1987. 23 p. (Boletim Científico, 9).
- CAMHI, J. D. Tratamento do vinhoto, subproduto da destilação de álcool. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 94, p. 18-23, 1979.
- CANELLAS, L. P.; BALDOTTO, M. A.; BUSATO, J. G.; MARCIANO, C. R.; MENEZES, S. C.; SILVA, N. M.; RUMJANEK, V. M.; VELLOSO, A. C. X.; SIMÕES, M. L.; MARTIN-NETO, L. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 331-340, 2007.
- CANTARELLA, H. Adubação nitrogenada em sistema de cana crua. **Revista Sociedade dos Técnicos Açucareiros do Brasil**, Piracicaba, v. 16, n. 4, p. 21-11, 1998.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; GALLO, P. B.; BOLONHEZI, D.; ROSSETTO, R.; MARTINS, J. L. M.; PAULINO, V. J.; ALCANTARA, P. B. Ammonia-losses of NBPT-treated urea under Brazilian soil conditions. In: IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED EFFICIENCY FERTILIZERS, 28-30 maio 2005. Frankfurt: Florida Department of Agriculture & Consumer Services, 2005. 1 CD-ROM.

- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van. Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo. In: SANTA, M. B. M. (Ed.). **Adubação nitrogenada no Brasil**. Ilhéus: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1985. p. 47-49.
- CASARINI, D. C. P.; CUNHA, R. C. A.; MASSET FILHO, B. Effects of irrigation with vinasse and the dynamics of its constituents in the soil: II Microbiological aspects. **Water Science Technology**, Oxford, v. 19, n. 8, p. 167-176, 1987.
- CHRISTOFFOLETI, P. J.; BACCHI, O. O. S. Efeito da aplicação de vinhaça sobre a população e controle químico das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Planta Daninha**, Campinas, v. 8, n. 1/2, p. 60-70, 1985.
- 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**, Jaboticabal, v. 28, p. 196-203, 2008.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma Técnica P 4.231**. Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. São Paulo: Cetesb, 2006. 12 p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo: 2007-2009**. São Paulo: Cetesb, 2010. 258 p. (Série Relatórios).
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: Cetesb, 2001. 247 p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Utilização de restilo como fertilizante em solos cultivados com cana-de-açúcar**: relatório final. São Paulo: Cetesb, 1982. 262 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2012/2013, primeiro levantamento Abril/2012**. Brasília, DF: Conab, 2012. 19 p.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Conama n. 1, de 23 de janeiro de 1986**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. Acesso em: 12 dez. 2012.
- CRUZ, R. L.; RIGHETTO, A. M.; NOGUEIRA, M. A. Experimental investigation of soil and groundwater impacts caused by vinasse disposal. In: INTERNATIONAL SEMINAR OF POLLUTION, PROTECTION AND CONTROL OF GROUND WATER, 20-21 setembro 1990, Porto Alegre. **Proceedings...** Porto Alegre: Abas, 1990.
- CUNHA, R. C. A.; COSTA, A. C. S.; MASSET FILHO, B.; CASARINI, D. C. P. Effects of irrigation with vinasse and the dynamics of its constituents in the soil: I - Physical

- and chemicals aspects. **Water Science and Technology**, Oxford, v. 19, p. 155-156, 1987.
- DAUDÉN, A.; QUÍLEZ, D. Pig slurry versus mineral fertilization on corn yield and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated environment. **European Journal Agronomy**, Amsterdam, v. 21, p. 7-19, 2004.
- ELIA NETO, A.; NAKAHODO, T. **Caracterização físico-química da vinhaça: relatório técnico da seção de tecnologia de tratamento de águas do Centro de Tecnologia Copersucar**, Piracicaba: Copersucar, 1995. 26 p.
- ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A.; DONZELLI, J. L. Processo agroindustrial. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR; CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília, DF: ANA, 2009. p. 51-65.
- ELIA NETO, A.; ZOTELLI, L.C. **Caracterização das águas residuárias para reuso agrícola**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), 2008. 31 p.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.
- FERREIRA, E. S.; MONTEIRO, A. O. Efeitos da vinhaça nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, n. 37, p. 3-7, 1987.
- FREIRE, F. M.; ROCHA, B. V.; RIBEIRO, A. C.; FREIRE, J. C. **Vinhoto como fertilizante na cultura da mandioca**. Belo Horizonte: Epamig, 1983. (EPAMIG. Pesquisando, 76).
- FREIRE, M. B. G. dos S.; FREIRE, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 929-954.
- FREIRE, W. J.; CORTEZ, A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p. (Série Engenharia Agrícola, 1).
- FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mais que sustentável. **Pesquisa Fapesp**, São Paulo, v. 151, p. 74-75, 2008.
- FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Vinhaça alternativa. **Pesquisa Fapesp**, São Paulo, v. 186, p. 70-73, 2011.
- GARCIA, J. C. C.; SPERLING, E. von. Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, p. 217-222, 2010.

GAY, S. W.; KNOWLTON, K. F. **Ammonia emissions and animal agriculture**. Blacksburg: Virginia Cooperative Extension. 2009. p. 442-110.

GLOEDEN, E.; CUNHA, R. C.; FRACCAROLI, M. J. B.; CLEARY, R. W. **The behavior of vinasse constituents in the unsaturated and saturated zones in the Botucatu Aquifer recharge area**. São Paulo: Cetesb, 1990. 11 p.

GLÓRIA, N. A. da; ORLANDO FILHO, J. Aplicação da vinhaça como fertilizante. **Boletim Técnico Planalsucar**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 1-38, 1983.

GONZALO, D. D. P.; CASAGRANDE, J. C.; SOARES, M. R.; MOUTA, E. R. Effect of high levels of vinasse application on soil fertility and potash leaching. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE - FRONTIERS OF SOIL SCIENCE, 18., 2006, Pennsylvania. **Anais...** Pennsylvania: [s.n.], 2006.

HASSUDA S. **Impactos da infiltração da vinhaça de cana no Aquífero Bauru**. 1989. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HASSUDA, S.; REBOUÇAS, A. da C.; CUNHA, R. C. de A. Aspectos qualitativos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero Bauru. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 11, p. 5-20, 1990.

JADOSKI, C. J.; TOPPA, E. V. B.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Physiology development in the vegetative stage of sugarcane, **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Santa Cruz, v. 3, n. 2, p. 169-176, 2010.

JIMENEZ, A. M.; BORJA, R.; MARIN, A.; RAPOSO, F. Kinetic analysis of the anaerobic digestion of untreated vinasses and vinasses previously treated with *Penicillium decumbis*. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 80, p. 303-310, 2006.

KOFFLER, N. F. **A profundidade do sistema radicular e o suprimento de água às plantas no Cerrado**. Piracicaba: Potafós, 1986. 12 p. (Informações Agronômicas, 33).

KORNDÖRFER, G. H.; OLIVEIRA, L. A. de O potássio na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 469-490.

LEAL, J. R. Potencial redox e pH: variações em um solo tratado com vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 257-261, 1983.

LOPES, E. S.; PERON, S. C.; PORTUGAL, E. P.; GIARDINI, A. R. Efeito residual da vinhaça na população autóctone de *Rhizobium* do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n.1, p. 29-36, 1986.

LUDOVICE, M. T. F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre lençol freático**. 1997. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. Toposequência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, p. 525-532, 2003.

MAGALHÃES, V. R. **Influência de doses de vinhaça nas características agrônômicas de variedades de cana-de-açúcar, cana-planta e atributos do solo**. 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Montes Claros, Montes Claros.

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; GALLO, P. B.; BATAGLIA, O. C. Efeitos de adubos potássicos na produção da soja. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, n. 1, p. 82-89, 1994.

MATTIAZZO-PREZOTTO, M. E.; GLÓRIA, N. A. Efeito da vinhaça na acidez do solo. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil**, Piracicaba, v. 4, p. 35-40, 1985.

MEDINA, C. de C.; NEVES, C. S. V. J.; FONSECA, I. C. de B.; TORRETI, A. F. Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 23, p.179-184, 2002.

MERKEL insiste em produção sustentável de biocombustíveis. 14 maio 2008. Disponível em: <<http://www.dw-world.de/dw/article/0,2144,3336488,00.html>>. Brasília, DF, maio 2008. Acesso em: 3 out. 2012.

MOHANAA, S.; DESAIA, C.; MADAMWAR, D. Biodegradation and decolourization of anaerobically distillery spent wash by a novel bacterial consortium. **Bioresources Technology**, Amsterdam, v. 98, p. 333-339, 2007.

NEVES, M. C. P.; LIMA, I. T.; DOBEREINER, J. Efeito da vinhaça sobre a microflora do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 131-136, 1983.

NITAYAVARDHANA, S.; KHANAL, S. K. Innovative biorefinery concept for sugarbased ethanol industries: production of protein-rich fungal biomass on vinasse as an aquaculture feed ingredient. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 101, p. 9078-9085, 2010.

OLIVEIRA, B. G. de. **Vinhaça da cana-de-açúcar: fluxos de gases de efeito estufa e comunidades de archaea presente no sedimento do canal de sedimentação**. 2010.

96 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, J. R. A.; VILELA, L.; PAULA, J. L. Adsorção de nitrato em solos do cerrado do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 1199-1205, 2000.

OLIVEIRA, M. de S. **Tolerância de variedades de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) à toxidez pelo alumínio em solução**. 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo.

ORLANDO FILHO, J.; BITTENCOURT, V. C.; ALVES, M. C. Aplicação de vinhaça em solo arenoso do Brasil e poluição do lençol freático com nitrogênio. **Revista Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil**, Piracicaba, v. 13, n. 6, p. 14-16, 1995.

ORLANDO FILHO, J.; LEME, E. J. de A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: SIMPOSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1984, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa, 1984. p. 451-475.

ORLANDO FILHO, J.; SILVA, G. M. de A.; LEME, E. J. de A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA-Planalsucar, 1983a. p. 229-264.

ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JÚNIOR, E.; AGUJARU, R. Efeito da aplicação prolongada da vinhaça nas propriedades químicas dos solos com cana-de-açúcar: estudo exploratório. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil**, Piracicaba, v. 1, p. 28-33, 1983b.

PASSARIN, A. L.; RODRIGUEIRO, E. L.; ROBAINA, C. R. P. MEDINA, C. de C. Caracterização de agregados em um Latossolo Vermelho distroférrico típico submetido a diferentes doses de vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 1255-1260, 2007.

PAULA, M. de; PEREIRA, F. A. R.; ARIAS, E. R. A.; SCHEEREN, B. R.; SOUZA, C. C. de; MATA, D. S. de. Fixação de carbono e a emissão dos gases de efeito estufa na exploração da cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 633-640, 2010.

PAULA, M. B. de; CARVALHO, V. D. de; NOGUEIRA, F. D. Efeitos da vinhaça na produção e qualidade da cebola em solo de baixo potencial de produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 274, n. 3, p. 389-393, 1992.

PAULA, M. B. de; FONTES, P. C. R.; CARVALHO, V. D. de; NOGUEIRA, F. D. Utilização de vinhaça como fonte de potássio para a cultura da batata. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 7, n. 2, p. 6-8, 1989.

PAULA, M. B. de; HOLANDA, F. S. R.; MESQUITA, H. A.; CARVALHO, V. D. de. Uso da vinhaça no abacaxizeiro em solo de baixo potencial de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, p. 1217-1222, 1999.

PAULINO, A. F.; MEDINA, C. de C.; ROBAINA, C. R. P.; LAURANI, R. A. Produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetida a doses de vinhaça. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 23, p. 145-150, 2002.

PENATTI, C. P.; CAMBRIA, S.; BONI, P. S.; ARRUDA, F. C. de O.; MANOEL, L. A. Efeitos da aplicação de vinhaça e nitrogênio na soqueira da cana-de-açúcar. **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, n. 44, p. 32-38, 1988.

PEREIRA, J. P.; ALVARENGA, E. M.; TOSTES, J. R. P.; FONTES, L. E. F. Efeito da adição de diferentes doses de vinhaça a um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico na germinação e vigor de sementes de milho. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, DF, v. 41, n. 2, p.147-150, 1992.

PRADA, S. M.; GUEKEZIAN, M.; SUAREZ-IHA, M. E. Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 249-252, 1998.

PRADO, R. de M.; PANCELLI, M. A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, Campinas, v. 67, p. 951-959, 2008.

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

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

RAMOS, N. P.; NOVO, M. do C. de S. S.; UNGARO, M. R. G.; LAGO, A. A. do; MARIN, G. C. Efeito da vinhaça no desenvolvimento inicial de girassol, mamona e amendoim em casa de vegetação. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 685-692, 2008.

REIS, T. C.; RODELLA, A. A. Cinética de degradação da matéria orgânica e variação do pH do solo sob diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, p. 619-626, 2002.

RESENDE, A. S.; SANTOS, A.; XAVIER, R. P.; COELHO, C. H.; GONDIM, A.; OLIVEIRA, O. C.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 30, p. 937-941, 2006.

- RIBEIRO, A. C.; SENGIK, E. Efeito da aplicação da vinhaça sobre a dispersão de argila de amostras de latossolos. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 30, p. 12-18, 1983.
- RIBEIRO, B. T.; LIMA, J. M. de; CURTI, N.; OLIVEIRA, G. C. de; LIMA, P. L. T. Cargas superficiais da fração argila de solos influenciadas pela vinhaça e fósforo. *Química Nova*, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 5-10, 2011.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros & Marques Ed. Eletrônica, 2004. 302 p.
- ROBLES-GONZÁLEZ, V.; GALÍNDEZ-MAYER, J.; RINDERKNECHT-SEIJAS, N.; POGGI-VARALDO, H. M. Treatment of mescal vinasses: a review. *Journal of Biotechnology*: [S.L.], v.157, p. 524-546, 2012.
- ROCHA, P. N. Hipercalemia. *Jornal Brasileiro de Nefrologia*, São Paulo, v. 31, p. 5, 2009.
- RODELLA, A. A.; FERRARI, S. E. A composição da vinhaça e efeitos da sua aplicação como fertilizante na cana-de-açúcar. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, v. 90, p. 380-387, 1977.
- RODELLA, A. A.; ZAMBELLO JÚNIOR.; ORLANDO FILHO, J. Effects of vinasse added to soil on pH and exchangeable aluminum content. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17., 1983, Havana, 1983. *Proceedings...* Havana: Universidad de La Habana, 1983. p. 237-245.
- ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. L.; TAVARES, S. Cana-de-açúcar. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: III culturas**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010a. p.163-230.
- ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F. Nutrição e adubação da cultura de cana-de-açúcar: indagações e reflexões. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 110, p. 6-11. (POTAFOS. Encarte Técnico).
- ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. L.; TAVARES, S. Potássio. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2010b. p. 289-312.
- SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 33, p. 1101-1107, 2009.
- SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Lei Estadual n. 11.241, de 19 de setembro de 2002**. Disponível em: <http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual_11241_2002.pdf>. Acesso em: 22 de nov. 2012.

- SCHULTZ, N.; LIMA, E.; PEREIRA, M. G.; ZONTA, E. Efeito residual da adubação na cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 34, n. 3, p. 811-820, 2010.
- SENGIK, E.; CANA, M. A. O.; SILVA, C. C.; RIBEIRO, A. C. Efeitos da vinhaça sobre o crescimento do sorgo granífero. In: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ, CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS. **Anuário CCA.... 1995/1996**. Maringá: Ed. da Universidade Estadual de Maringá, 1996. p. 163-166.
- SENGIK, E.; KIEHL, J. de C.; SILVA, M. A. G. da; PALANGANA, D. C.; LAWDER, M. R. Perdas de amônia em solo e de resíduos orgânicos autoclavados e tratados com uréia. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 23, n. 5, p.1099-1105, 2001.
- SENGIK, E.; RIBEIRO, A. C.; CONDE, A. R. Efeito da vinhaça em algumas propriedades de amostras de dois solos de Viçosa, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 12, n. 1, p. 11-15, 1988.
- SILVA, G. M. de A. Influência da adubação nitrogenada na qualidade da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA: Planalsucar, 1983. p. 317-332.
- SILVA, L. C. F.; CASAGRANDE, J. C. Nutrição mineral da cana-de-açúcar (macronutrientes). In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA: Planalsucar, 1983. p. 77-96.
- SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R. F. Contribution of soil organic carbon to the ion exchange capacity of tropical soils. *Journal of Sustainable Agriculture*, Washington, DC, v. 32, p. 439-462, 2008.
- SZMRESCANYI, T.; GONÇALVES, D. B. Efeitos socioeconômicos e ambientais da expansão da lavoura canavieira no Brasil. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO DE ESTUDOS LATINO-AMERICANOS, 27., 2009, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: [s.n.], 2009. p.1-21.
- TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W. de; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. de C.; BENDASSOLLI, J. A. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 37, n. 2, p. 193-201. 2002.
- VALSECHI, O. Alguns aspectos do problema da vinhaça. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, v. 46, p. 57-62, 1955.
- VITTI, G. C.; MAZZA, J. A. **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Potafos, 2002. 16 p. (Encarte técnico/ Informações Agronômicas, 97).

WANG, H.; ZHAO, Y. A bench scale study of fermentative hydrogen and methane production from food waste in integrated two-stage process. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S.l.], v. 34, p. 245-254, 2009.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 2297-2305, 2008.

WOOD, A.W. Management of crop following Green harvesting of sugar cane in North Queensland. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 69-85, 1991.



Capítulo 5

APROVEITAMENTO DOS DEJETOS DE SUÍNOS E BOVINOS COMO FERTILIZANTES

IMPACTOS AMBIENTAIS E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO

*Celso Aita
Sandro José Giacomini
Stefen Barbosa Pujol
Rodrigo da Silveira Nicoloso
Juliano Corulli Corrêa*