

Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça: fertirrigação, concentração e biodigestão

Technical, economic and environmental viability analysis of the current vinasse use: ferti-irrigation, concentration and bio-digestion

RESUMO

Nesse estudo resume-se a análise da viabilidade técnica, dos aspectos econômicos e ambientais das tecnologias de condicionamento e aproveitamento da vinhaça mais difundidas no Brasil e, em especial, no Estado de São Paulo: aplicação *in natura* no solo (fertirrigação *in natura*), biodigestão e concentração. A viabilidade técnica foi confirmada para as três tecnologias estudadas, seja pela utilização em campo, com ampla vantagem para a aplicação *in natura*, ou pela diversificada oferta das tecnologias de biodigestão e concentração pelo mercado especializado. Quanto à viabilidade econômica, a fertirrigação *in natura* se demonstrou altamente lucrativa, a biodigestão, que contou com tecnologias complementares de geração de energia elétrica para a análise de sua viabilidade, apresentou-se viável quando associada aos queimadores e turbinas em todas as condições estudadas, no entanto, abaixo dos valores de venda de energia atualizados. A tecnologia da concentração se demonstrou completamente inviável a partir das condições econômicas utilizadas. Já na questão ambiental, a fertirrigação *in natura* apresentou diversas vantagens e desvantagens, ficando a sua utilização condicionada a estudos locais. Para a biodigestão e a concentração, essas tecnologias apresentaram diversos ganhos frente à utilização *in natura*, sendo a primeira responsável pela mitigação dos GEE's e a segunda por uma aplicação de vinhaça mais racional e por um melhor equacionamento dos altos volumes de água utilizados pelas usinas e destilarias.

PALAVRAS-CHAVE: vinhaça – usos; vinhaça - disposição reutilização, racionalização

ABSTRACT

This study summarizes the technical, economic and environmental feasibility of three widespread technologies used for conditioning and reuse of vinasse in Brazil, particularly in the State of São Paulo: *in natura* fertigation, biodigestion and concentration. The technical feasibility was confirmed for the three technologies, as there are several suppliers of equipment for the three processes, with a great advantage for fertigation, which is the most common fate of vinasse in Brazil. As for the economic feasibility *in natura* fertigation resulted as a highly profitable use of the vinasse. Biodigestion is economically viable when associated to simple burners, just for in-plant use of the heat produced by methane combustion, or associated to gas turbine powered electrical generators. However, the current selling price of the excess electrical energy produced using the biogas in a sugar cane plant is below the price reached when other forms of power plants are used to produce electricity. The concentration of vinasse showed as an unviable economically if the economic conditions currently found in Brazil prevails. Environmentally *in natura* fertigation showed advantages and disadvantages and from an environmental point of view its use is depends upon local conditions. Biodigestion and concentration have several advantages as compared to *in natura* fertigation. While biodigestion decreases the emission of greenhouse gases, concentration provides a more rational use of vinasse for fertigation and decreases the usage of water in sugar plants and ethanol distilleries

KEYWORDS: vinasse – uses; vinasse - disposal; rationalization

Luiz Felipe Lomanto Santa Cruz
Mestre em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos – USP
São Carlos, SP, Brasil
luizfelipelomanto@gmail.com

Carla Grigoletto Duarte
Engenheira Ambiental, Doutora em Ciências pelo PPGSEA da EESC/USP Pesquisadora de Pós-doutorado - Escola Politécnica/USP
São Paulo, SP, Brasil
carla.duarte@usp.br

Tadeu Fabrício Malheiros
Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP
São Carlos, SP, Brasil
tmalheiros@usp.br

Eduardo Cleto Pires
Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP
São Carlos, SP, Brasil
ecpires@sc.usp.br

INTRODUÇÃO

A vinhaça é um resíduo líquido proveniente da destilação de uma solução alcoólica chamada vinho, obtida do processo de fermentação para obtenção do álcool. Esse resíduo pode ter como matéria prima o caldo de cana, o melaço ou a mistura de proporções, ou de diluições destes.

Andrade (2009) ressalta que a vinhaça que é gerada numa razão de 10,3 a 11,9 litros por cada litro de álcool produzido, apresenta temperatura elevada, pH ácido, corrosividade, alto teor de potássio, quantidades significativas de nitrogênio, fósforo, sulfatos e cloretos.

Até quase o final da década de 70, a vinhaça era lançada diretamente em corpos d'água, o que trazia impactos negativos tanto para a comunidade aquática desses habitats quanto para os seres humanos que sofriam com a deterioração da qualidade da água para usos diretos e indiretos.

Advinda da grande preocupação quanto aos impactos do uso da vinhaça no ambiente, foi instituída em 28 de fevereiro de 1967, o Decreto Lei nº 303 que proibiu a disposição da vinhaça nos rios, lagos e cursos de água. Posteriormente, a Portaria nº 323 de 29 de novembro de 1978, publicada pela Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA) e vinculada ao Ministério do Interior, também proibiu o lançamento direto ou indireto de vinhaça em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool, a partir da safra 1979/1980 (CORAZZA, 1999).

Com a proibição, outros destinos tiveram que ser encontrados para a disposição da vinhaça. Inicialmente se utilizaram das áreas de sacrifício que, segundo Andrade (2009), eram áreas ditas de inundação, onde se formavam extensos alagados para permitir sua infiltração no terreno, sem nenhum controle. No entanto, esse novo método de disposição também era

improdutivo e ambientalmente impróprio, uma vez que indisponibilizava o solo para usos futuros além de causar a poluição das águas subterrâneas. Com a proibição do lançamento nos cursos de água, a perda contínua das áreas de sacrifício (já que se tornavam inutilizáveis para a agricultura) e o crescente volume de vinhaça produzido, outra forma de disposição passou a ser prontamente utilizado a partir da década de 70: a fertirrigação.

Atualmente outras tecnologias já estão sendo utilizadas pelos grandes grupos do setor sucroenergético, seja substituindo as técnicas anteriormente expostas ou complementando-as. As duas principais alternativas à fertirrigação já usadas em escala industrial no setor são a biodigestão e a concentração.

Esse artigo apresenta a análise da viabilidade técnica, a mensuração dos aspectos econômicos e caracterização dos aspectos ambientais das tecnologias de condicionamento e aproveitamento da vinhaça mais difundidas no Brasil e, em especial, no estado de São Paulo: aplicação *in natura* no solo (fertirrigação *in natura*), biodigestão e concentração.

Na primeira parte do artigo, é apresentada uma caracterização dessas três tecnologias e, posteriormente, a análise quanto à viabilidade técnica, econômica e ambiental, respectivamente, contemplando as três tecnologias em cada uma das seções. Para a realização dos estudos foram realizadas visitas de campo em 43 unidades agroindustriais sucroenergéticas do estado de São Paulo durante as safras 2009/2010 e 2010/2011, levantamento no banco de dados do Projeto Ambiental Estratégico Etanol Verde do Estado de São Paulo e literatura especializada sobre o setor. As usinas visitadas foram escolhidas entre aquelas que fazem parte do Protocolo Agroambiental de São Paulo, procurando-se que fossem

representativas das várias capacidades de produção e estágios de modernização das instalações encontradas no estado de São Paulo. Mais detalhes sobre o método e cálculos realizados podem ser consultados em Cruz (2012).

O APROVEITAMENTO DA VINHAÇA NA FERTIRRIGAÇÃO, BIODIGESTÃO E CONCENTRAÇÃO

Na fertirrigação, a disposição da vinhaça é feita diretamente no solo sem nenhuma forma de pré-tratamento. Os benefícios advindos da fertirrigação são tanto diretos, através da redução no custo com a adubação, quanto indiretos, visto que aumentam a fertilidade natural dos solos onde esse subproduto é aplicado. Rossetto (2008) ressalta que a vinhaça é um material de origem orgânica, sem a presença de metais ou outros contaminantes que impeçam seu uso agrícola e, nesse sentido, é perfeitamente aceita pela agricultura orgânica, sem restrições ao seu uso como fonte de nutrientes pelas empresas certificadoras.

Segundo Andrade (2009) o uso da vinhaça repõe ao solo os nutrientes que as plantas dele retiram, aumenta a produtividade agrícola, eleva o pH do solo, aumenta a disponibilidade de alguns nutrientes e imobiliza outros, eleva a população microbiana, o poder de retenção de água e melhora a estrutura física do solo.

Contudo, vale ressaltar que feita de maneira descontrolada (taxa de aplicação excessiva), o uso contínuo da vinhaça como fertilizante pode trazer efeitos negativos para o ambiente no qual é empregado. Madejon (2001) sugere que se pode esperar uma elevação na concentração de sais no solo e potencial risco de salinização com a aplicação de vinhaça ao longo dos anos. Essas observações, no entanto, devem ser vistas com

cautela, uma vez que os estudos foram elaborados na Espanha, país com características de solo e clima diferentes dos encontrados no Brasil. Segundo Meurer *et al.* (2000), apud Silva (2006), o fosfato e o nitrato, existentes em grandes concentrações na vinhaça, se destacam como possíveis contaminantes de águas superficiais e subterrâneas. Agrega-se a este potencial poluidor, as altas concentrações de potássio existentes na vinhaça que, apesar de não ser um poluente direto, favorece a formação de complexos químicos com compostos potencialmente poluidores das águas, como é o caso do nitrato. Portanto, a associação do potássio (K^+) ao nitrato (NO_3^-), por apresentar carga neutra, é facilmente lixiviado para as águas subterrâneas (ROSSETTO, 2008).

Na biodigestão anaeróbia da vinhaça, ocorre a geração de biogás, com geração de um efluente tratado, com alto poder nutricional em NPK e remoção de parte da carga orgânica. Como as taxas de incorporação da matéria orgânica pelo solo ainda não foram devidamente estabelecidas, considerou-se, por hipótese, que a utilização para gerar biogás garante aproveitamento da matéria orgânica remanescente.

A tecnologia de biodigestão tem como vantagens o baixo consumo de energia, a pequena produção de lodo (descarte), a grande eficiência na diminuição da carga orgânica, baixo potencial poluidor, sendo que o biogás produzido poderá ser empregado no processo de produção de energia (FREIRE; CORTEZ, 2000).

De acordo com Salomon (2007), são claras as vantagens da produção de energia elétrica a partir de biogás, entre elas: geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de uma fonte renovável que vem sendo tratada como resíduo; possibilidade de receita extra, proveniente da energia gerada com biogás e

vendida às concessionárias; redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária; possibilidade de uso de processos de cogeração; redução das emissões de metano para a atmosfera, pois este também é um importante gás de efeito estufa; créditos de carbono; redução de odores etc. Por outro lado, existem alguns desafios a serem vencidos que impedem a ampla utilização do biogás, como: não disponibilidade de tecnologias estabelecidas de geração a partir de vinhaça; limpeza do biogás; viabilidade econômica; falta de fiscalização; e penalidades por possíveis danos ambientais.

Por fim, a concentração da vinhaça é uma tecnologia utilizada para reduzir a quantidade de água presente neste subproduto, reduzindo o seu volume e conseqüentemente os custos com transporte e aplicação na fertirrigação. A concentração da vinhaça, além de proporcionar uma maior flexibilização na logística de aplicação no solo (fertirrigação), também condiciona a vinhaça para outras utilizações, entre elas, ração animal, combustível para caldeiras especiais e posterior geração de energia. Agrega-se também o potencial de redução da captação de água pela usina, uma vez que o condensado retirado da vinhaça já retorna para o sistema produtivo das plantas industriais em algumas Usinas (ALBERS, 2007).

A concentração era um processo de pouca abrangência no setor sucroenergético do país, visto seu alto custo energético, padrão que vem se alterando com a difusão da cogeração (produção de vapor e de eletricidade) nas unidades agroindustriais.

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA

Aplicação *in natura* no solo

A viabilidade técnica foi analisada através de uma

abordagem simplificada e realística de inter-relação entre a fertirrigação *in natura* nas unidades agroindustriais integrantes do Protocolo Agroambiental de São Paulo (165 unidades agroindustriais) e a sua efetiva aplicabilidade, ou seja, a disseminação da tecnologia no setor atestando a sua viabilidade. Além disso, nesta fase inicial foi avaliado o número de unidades agroindustriais que utilizavam técnicas preliminares para condicionamento ou reutilização da vinhaça.

A partir dos dados referentes à safra 2009/2010 de 165 unidades agroindustriais (Destilarias e unidades agroindustriais de açúcar e álcool certificadas pelo Projeto Etanol Verde da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo) elaborou-se a Tabela 1 que apresenta informações gerais em relação à produção de álcool e vinhaça, número de unidades agroindustriais que se utilizam da aplicação *in natura* da vinhaça no solo agrícola e aquelas que adotam, preliminarmente, alguma das tecnologias estudadas - biodigestão e concentração.

Verificou-se a utilização da fertirrigação em 100% das unidades agroindustriais signatárias do Protocolo Agroambiental, sendo que apenas 5% do total gerado é destinado a tecnologias de biodigestão e concentração.

Biodigestão

A viabilidade técnica foi analisada por meio de dois caminhos: - (a) Levantamento, entre as unidades agroindustriais pertencentes ao Protocolo Agroambiental de SP que foram visitadas durante o período de elaboração e desenvolvimento do projeto, daquelas que apresentaram um projeto de biodigestão, seja em fase de implantação ou que já estivesse em pleno funcionamento. Também foram coletados dados referentes ao volume médio de tratamento, subprodutos finais a

Tabela 1 – Unidades agroindustriais integrantes do Protocolo Agroindustrial de São Paulo (safra 2009/2010)

Nº	Produção de álcool* m ³	m ³ vinhaça/m ³ etanol	Produção de Vinhaça** m ³	Aplicação <i>in natura</i>	Uso de outra tecnologia
165	15.110.954	12	181.935.886	161	8

*Estimativa considerando a moagem de cana

** Estimativa considerando a média do Protocolo de 12,04 litros de vinhaça/litro de álcool produzidos

serem reutilizados como biofertilizante¹ e/ou biogás, que é destinado à geração de energia) tipo de investimento recebido (investimento próprio ou parceria), e outras informações específicas da unidade. – (b) Análise dos projetos de biodigestão disponibilizados no mercado pelas grandes empresas de tecnologia voltadas para o setor sucroenergético ou para setor de tratamento de resíduos (subprodutos) agrícolas e industriais.

Por meio dessas duas abordagens procurou-se estabelecer uma relação direta entre a viabilidade técnica e a existência de projetos/tecnologias de biodigestão em utilização nas unidades agroindustriais ou disponíveis no mercado.

Dentre as 43 unidades agroindustriais visitadas durante o período de elaboração do projeto, verificou-se a existência de apenas um projeto de biodigestão para a vinhaça. Este projeto, em escala piloto, se encontrava na fase final de instalação e foi projetado para um volume de tratamento de aproximadamente 40 m³.h⁻¹. Entre os produtos finais do processo, a vinhaça biodigerida terá a mesma finalidade de fertirrigação e o biogás gerado será destinado à produção de energia elétrica através de turbogeradores específicos para este tipo de biocombustível. O projeto advém de uma parceria entre a respectiva empresa de açúcar e

álcool e a concessionária de energia elétrica local, sendo a última a maior investidora quanto aos custos relacionados com a aquisição, instalação e manutenção da tecnologia.

Outra planta em funcionamento no Estado de São Paulo pertence à Usina São Martinho de Pradópolis. A planta, em escala industrial, apresenta um reator de 5.000 m³, sendo o biogás destinado à queima nas caldeiras geradoras de vapor. Assim, a empresa obtém um aumento na geração de vapor e na geração de energia elétrica através do sistema de cogeração². Outro uso designado para o biogás produzido nesta unidade é a secagem de levedura, retirada do processo de fermentação em dornas, por meio da energia térmica da combustão do gás nas caldeiras.

Atualmente há dois principais projetos comerciais para biodigestão da vinhaça. O projeto oferecido pela empresa Dedini[®] é denominado Methax Dedini[®] e se utiliza de reatores de leito de lodo expandido com circulação interna, uma variação dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB). O projeto apresenta como propostas a utilização do biofertilizante na lavoura e o biogás pode ter três diferentes usos: na queima do biogás, em caldeiras pré-existentes, para a produção de vapor utilizável na indústria, resultando em

economia e possível venda de bagaço residual; para geração de energia elétrica na combustão direta do biogás em turbinas ou através da utilização do vapor nas turbinas; e diretamente em motores de caminhões.

O projeto da empresa Brasmetano[®] é o Stillax[®] e tem como proposta a utilização de um sistema integrado para a geração de biogás, a partir do tratamento biológico da vinhaça, e demais subprodutos das unidades agroindustriais de açúcar e álcool. O sistema integrado Stillax[®], segundo o fornecedor, permite a transformação de até 90% da matéria orgânica da vinhaça em biogás; a obtenção de energia elétrica para auto sustentação de todo o sistema e/ou venda; obtenção de energia térmica (inclusive para a concentração da vinhaça); valorização da vinhaça pela concentração possibilitando a complementação química para ampliar seu potencial como adubo; entre outros.

Concentração

A viabilidade técnica da concentração foi analisada por meio do levantamento de dados das unidades agroindustriais que têm projeto de concentração, seja em fase de implementação ou operação, entre as pertencentes ao Protocolo Agroambiental de São Paulo. Também foram analisados os projetos de concentração disponibilizados no mercado pelas grandes empresas de tecnologia voltadas para o setor sucroenergético ou para setor de

1 Subproduto líquido da biodigestão. Quando aplicado ao solo, traz tantos benefícios quanto à aplicação *in natura* visto a manutenção da sua carga nutricional inicial.

² Cogeração – “Produção simultânea de dois ou mais tipos de energia (elétrica, mecânica e térmica-útil) a partir de uma única fonte primária”.

tratamento de resíduos (subprodutos) agrícolas e urbanos. Por meio dessas duas abordagens procurou-se estabelecer uma relação direta entre a viabilidade técnica e a existência de projetos/tecnologias de concentração em utilização nas unidades agroindustriais ou disponíveis no mercado.

Quanto às plantas em funcionamento, verificou-se a existência de apenas um projeto de concentração para a vinhaça dentre as unidades visitadas. O projeto, uma planta em escala piloto reduzida, já havia transitado por outras unidades agroindustriais com a finalidade de atestar sua eficiência no tratamento de vinhaças de diferentes características. Diferente da biodigestão, a tecnologia de concentração da vinhaça vem ampliando a sua participação dentro do setor sucroenergético nacional de maneira mais expressiva, tendo como principais representantes os estados de Minas Gerais, Mato Grosso e São Paulo. Quanto ao estado de São Paulo, seis unidades agroindustriais apresentam plantas de concentração em escala industrial e em pleno funcionamento. Apesar do número de plantas em funcionamento parecer pouco significativo, constatou-se através das visitas de campo que a maior parte das unidades agroindustriais contempla a possibilidade futura de utilização dessa tecnologia.

Dentre as unidades agroindustriais que se utilizam da concentração, uma em especial se destaca por ser a pioneira na adoção dessa tecnologia. A Usina Santa Elisa (atualmente integrante do grupo LDC-SEV), localizada no município de Sertãozinho - SP, foi a primeira usina do país a instalar, em 1978, uma unidade de concentração de vinhaça. Apresentando na época uma vazão de entrada da vinhaça de $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com 6º de Brix 10, e uma vazão de saída da vinhaça concentrada de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com um Brix de 60º, a planta ainda se

encontra em pleno funcionamento, porém apresentando parâmetros de concentração diferentes dos iniciais para Brix e eficiência de concentração. Foram identificadas outras cinco usinas que usam concentração no estado de São Paulo: Usina Cerradinho em Potirendaba, Usina Rio Pardo em Cerqueira César, a Usina Santa Rosa em Boituva, a Usina Zanin em Araraquara e a Usina da Pedra em Serrana.

Quanto aos fornecedores disponíveis no mercado, foram identificados projetos das empresas Citrotec® de Araraquara/SP e da Dedini®. A planta Ecovin® – Evaporador de Concentração de Vinhaça, da Citrotec®, se utiliza de evaporadores com o funcionamento baseado no princípio de névoa turbulenta descendente acelerada termicamente. Segundo os fornecedores, a tecnologia apresenta como vantagens a alta taxa de evaporação, baixa taxa de incrustação (limpeza automatizada por meio de produtos químicos), baixo consumo energético, operação fácil e possibilidade de automatização completa. A vinhaça concentrada poderá ser usada na fertirrigação, alimentação animal, solidificação, queima e biodigestão.

O sistema Dedini para concentração de vinhaça é tecnologia T.A.S.T.E.® (*Thermally Accelerated Short Time Evaporator*) e também está baseado na evaporação em múltiplos estágios com evaporadores em névoa turbulenta de fluxo descendente. Em relação aos benefícios advindos da instalação da tecnologia, destacam-se a redução do volume de vinhaça a um oitavo, sem aumento do consumo de vapor da destilaria, já que os sistemas são integrados; a economia no custo da fertirrigação, facilidade de distribuição em terras descontínuas e viabilização da distribuição para áreas distantes; e a produção de água evaporada de boa qualidade possibilitando a reutilização no processo industrial (embebição da

cana para extração, diluição do fermento na fermentação, diluição do mel para o preparo do mosto, lavagem de pisos, etc.) e consequente redução na captação dos corpos e cursos d'água.

Com um histórico de mais de três anos no estado de São Paulo, a tecnologia de concentração da vinhaça se tornou uma realidade dentro do setor sucroenergético, seja pela redução dos custos de aplicação da vinhaça no campo com a redução de seu volume ou pelos ganhos ambientais referentes à economia de água e à redução do potencial de poluição das águas subterrâneas. Através das visitas de campo, constatou-se a grande aceitação que essa tecnologia apresenta quando o assunto a ser debatido é o melhor gerenciamento do subproduto vinhaça. Quanto à viabilidade técnica, o fornecimento da tecnologia por empresas com alto nível de credibilidade e excelência tecnológica, a nível nacional e internacional, além dos ganhos econômicos e ambientais alcançados pelas unidades agroindustriais que já se utilizam dessa tecnologia, atestam essa viabilidade. Contudo, duas questões em especial freiam a introdução dessa tecnologia na maior parte das unidades agroindustriais pesquisadas: o alto custo da planta de concentração e a preferência por tecnologias que atuem na redução da produção de vinhaça.

ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Na análise econômica para a fertirrigação *in natura*, o objetivo principal foi de mensurar a economia (lucro) que as unidades agroindustriais do setor sucroenergético do estado de São Paulo apresentaram na safra 2009/2010 por meio da substituição dos fertilizantes minerais (NPK) pela fertirrigação *in natura* da lavoura. Definida a metodologia de análise,

esta também foi aplicada no âmbito da região centro-sul e do Brasil.

Para esta análise foram utilizados os seguintes parâmetros e/ou premissas:

- Área de cultivo e quantidade de cana processada pelas unidades agroindustriais signatárias do Protocolo Agroambiental para a safra 2009/2010.
- Área de cultivo e produção total de álcool da região Centro-Sul e do Brasil para safra 2009/2010, a partir do “3º Levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento sobre a cultura da cana-de-açúcar de Janeiro/2011” (CONAB, 2011).
- Quantidade e preço médio dos fertilizantes utilizados no ciclo produtivo da cana, obtidos no estudo publicado pela Pecege/ESALQ-USP intitulado “Custo de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil”, referente à safra 2009/2010.
- Dosagens médias de aplicação de vinhaça *in natura* para São Paulo, Centro-Sul e Brasil, a partir dos dados apresentados por Luz (2005);
- Estimativa dos gastos com adubação complementar das áreas fertirrigadas.
- Classificação e percentual das áreas de cana a serem utilizadas nas análises de viabilidade econômica para cada tecnologia, a partir do reagrupamento das categorias do INPE/CANASAT em três grupos: reforma, cana planta e cana soca.

Aplicação *in natura* no solo

Foram definidos quatro cenários para a análise econômica

da fertirrigação *in natura*³, sendo que o volume de aplicação utilizado e a adubação complementar (fósforo e nitrogênio) são as bases para a diferenciação entre eles.

No cenário I, foi considerada a fertirrigação *in natura* com a taxa de aplicação definida a partir da quantidade de nutrientes aplicados na adubação convencional, sem adubação complementar. Os resultados para esse cenário mostraram que a área de cultivo e a área efetivamente fertirrigada com vinhaça se encontra em torno de 25% a 35%, comprovando o completo potencial de reciclagem desse subproduto pelo setor sucroenergético. Tomando como referência o Protocolo Agroambiental, com as 165 usinas analisadas na safra 2009/2010, o ganho econômico obtido com a substituição da adubação mineral girou em torno de 2,57 milhões de Reais por Unidade Agroindustrial.

O cenário II, foi analisado para condições idênticas ao cenário I, mas com uso da adubação complementar. Os resultados mostram que a adubação complementar influenciou diretamente nos ganhos econômicos advindos da substituição da adubação mineral, uma vez que resultou em redução de aproximadamente 37% nos valores finais. Por outro lado, dentre os benefícios da adubação complementar, ressalta-se o aumento na longevidade e/ou produtividade da cultura da cana-de-açúcar, sendo seus resultados diretamente dependentes das características locais e da variedade de cana utilizada. Portanto, partindo do preceito que a prática da adubação complementar é estritamente necessária, também se constata os ganhos econômicos significativos que a substituição de parte da adubação mineral

proporcionaria para o setor, alcançando valores próximos de 1,62 milhões de reais por unidade agroindustrial quando se utiliza o Protocolo Agroambiental como referência.

No cenário III, a taxa de aplicação da vinhaça foi definida a partir de dosagens médias regionais, sem adubação complementar, e no cenário IV com adubação complementar.

A característica que mais se destaca nesses dois últimos cenários é o alto volume de vinhaça aplicado especialmente para a fertirrigação da cana planta, chegando a valores uma vez e meia maiores do que os utilizados nos cenários I e II. Com isso, a relação entre a área de cultivo e a área efetivamente fertirrigada com vinhaça apresentou uma expressiva redução chegando a valores entre 15 e 20%. Pelos mesmos motivos, os ganhos econômicos para o setor apresentaram uma redução para ambos os cenários: 1,67 milhões de reais para o cenário III (sem adubação complementar) e 1,1 milhões de reais para o cenário IV (com adubação complementar) por unidade agroindustrial, quando se utiliza o Protocolo Agroambiental como referência. Assim como na comparação anterior, a adoção da adubação complementar no cenário IV proporcionou uma redução dos ganhos econômicos por Unidade Agroindustrial em cerca de 0,57 milhões de Reais quando comparado ao cenário III. A Tabela 2 apresenta uma síntese dos resultados encontrados.

A partir desses resultados, ressalta-se a importância do gerenciamento adequado do uso da vinhaça para fertirrigação, assim como da adubação complementar, a fim de potencializar a sua distribuição no campo e conseqüentemente os ganhos econômicos e ambientais para o setor sucroenergético.

Biodigestão

³ Detalhes sobre os cálculos estão disponíveis nas páginas 51 a 57 de Cruz (2012)

Tabela 2 – Ganhos econômicos por região na safra 2009/2010 para aplicação *in natura* nos Cenários I, II, III e IV, em milhões de reais

Ganhos Econômicos safra 2009/2010	Usinas Protocolo	Centro-Sul	Brasil
Cenário I			
Taxa de adubação convencional, sem complementar.	424,7	760,0	846,2
Cenário II			
Taxa de adubação convencional, com complementar.	268,1	479,0	533,0
Cenário III			
Adubação média regional, sem complementar.	276,2	485,6	556,6
Cenário IV			
Taxa de adubação média regional, com complementar.	181,3	318,6	363,7

Fonte: elaboração própria

Tabela 3 - Parâmetros da planta de biodigestão

Parâmetros	Unidade	Valor
Volume do Reator	m ³	1.540,00
Dimensões (altura X diâmetro)	m x m	10 X 14
Vazão de Vinhaça	m ³ /dia	3.069,54
Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)	h	12,04
Produção de biogás	Nm ³ /dia*	36.834,52
Produção de metano (CH ₄)	Nm ³ /dia*	22.100,71
Energia disponível no biogás (60% de metano)	MJ/dia	847.635,96
Potencial disponível no biogás	MW	9,81

Fonte: Próprio autor. (* - Nm³ – normal metro cúbico, ou seja em condições normais de pressão e temperatura)

Tabela 4 - Parâmetros do processo de biodigestão

Parâmetros/Valores de Referência	Unidade	Valor
Concentração da vinhaça*	kg DQO/m ³	30,00
Eficiência da biodigestão	% de remoção	80,00
Taxa de conversão 1	NL** Biogás/g DQO _{Removida}	0,50
Taxa de conversão 2***	NL CH ₄ /g DQO _{Removida}	0,30
Densidade do Metano	kg/m ³	0,714
PCI do Biogás**** (60% de metano)	kJ/Nm ³	23.012,00

* Considerando a produção a partir do caldo; ***NL (Normal Litro)

Considerando o biogás com 60% de CH₄; *Poder calorífico inferior

Fonte: Baseado em Elia Neto e Shintaku (2009).

Para a análise da viabilidade econômica da biodigestão, foram definidos os seguintes parâmetros de usina padrão, equivalente a uma

usina de médio porte: moagem de 1,5 milhões de toneladas de cana por safra, com produção de etanol de 254,9 m³.d⁻¹, e produção de

vinhaça de 3.069,5 m³.d⁻¹. A definição de uma unidade produtiva padrão permitiu que estudos comparativos fossem aplicados aos

Tabela 5 - Comparação entre tecnologias de conversão

Tecnologias	Faixa de Potência Instalada (KW – MW)	Rendimento Elétrico (%)	Emissões de NO _x (ppm)
Motores a gás (Ciclo Otto)	30 – 20	30 - 40	250 - 3000
Microturbinas a gás (pequeno porte)	30 – 100	24 - 28	< 9
Turbinas a gás (médio porte)	500 – 150	20 - 30	35 - 50

Fonte: Adaptado de CENBIO, 2005, *apud* Figueiredo, 2007.

diversos projetos propostos para a geração de energia elétrica a partir do biogás.

A tecnologia de biodigestão recomendada para integrar os cenários propostos foi o reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactor*), fornecido por empresas de tecnologia ligadas ao setor sucroenergético, como a Brasmetano LTDA de Piracicaba – SP e a DEDINI S.A. de Ribeirão Preto – SP. O valor de referência calculado para a utilização do biogás (VB) pelas tecnologias propostas foi de 0,053 R\$/m³. As informações sobre os parâmetros da planta de biodigestão e do processo de biodigestão estão nas Tabelas 3 e 4 respectivamente.

Nos cenários econômicos definidos neste estudo, o uso do biogás é considerado para geração de energia elétrica para três cenários, com queimadores, motores à combustão interna e turbinas a gás, sempre com venda dos créditos de carbono. A Tabela 5 apresenta informações sobre as tecnologias de conversão.

Foi considerada depreciação dos equipamentos de 10% ao ano, taxa de juros de 11,92% (SELIC – BCB, 20/04/2011); horizonte temporal de 20 anos, e créditos de carbono vendidos no mercado do Protocolo de Kyoto a US\$ 10,00/TCO_{2equiv}; taxa cambial de US\$1,58/R\$ (BCB, 28/06/2011); taxa de desconto igual à taxa SELIC de 11,92% (Banco Central do Brasil,

20/04/2011); e taxa mínima de atratividade (TMA) de 15%. Os custos com a elaboração dos documentos e com o registro do projeto para geração de créditos de carbono não foram incluídos na análise econômica. Para a análise econômica, foram utilizados os métodos: Valor Presente Líquido (VLP), Análise Custo-Benefício (C/B), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Pay-Back.

Para os cenários com geração de energia elétrica, foi analisada a viabilidade econômica para três diferentes preços de venda de energia elétrica. Os preços adotados correspondem a dois leilões recentes e ao preço estabelecido no Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica do Ministério de Minas e Energia (PROINFA), sendo R\$102,41/MWh no Leilão de Energia A-3 / 2011, total contratado de 2.744,6 MW de potência instalada; R\$144,20/MWh nos Leilões de Fontes Alternativas 2010, total contratado de 2.892,2 MW de potência instalada; e R\$169,08/MWh para energia gerada por meio de biogás gerado de aterros sanitários, no PROINFA – 2002/2009.

No cenário I, foi considerada a queima do biogás em queimadores (*flares*) com venda do crédito de carbono. Os queimadores são utilizados como alternativa simples e eficiente na mitigação do aquecimento global e na geração de

créditos de carbono para o empreendedor que opta por esta tecnologia, já que proporcionam a transformação de gases poluentes de alto potencial de aquecimento global (CH₄) em poluentes secundários de potencial reduzido (CO₂). O investimento realizado para a implantação de queimadores com a finalidade de obtenção e venda de créditos de carbono se apresentou economicamente viável para os empreendedores do setor sucroenergético, apresentando um retorno do investimento realizado em apenas 1,7 anos.

No cenário II, a geração de energia elétrica é feita por meio de motores à combustão interna (motogerador de ciclo Otto). Para as duas condições iniciais, utilizando o PROINFA e o Leilão A-3 2010 como referência, a tecnologia dos motogeradores para a geração de energia elétrica se demonstrou economicamente viável. Os elevados valores dos VPLs representaram os lucros totais em valores atualizados que seriam revertidos para o empreendedor na escolha desta tecnologia. Somam-se a este fato, os curtos períodos de tempo necessários para que os investimentos realizados fossem readquiridos: 3,49 e 4,5 anos, respectivamente. Contudo, quando se utilizou como referência o valor de venda de energia estabelecido pelo Leilão A-3 de 2011 a tecnologia apresentou contornos de inviabilidade. A simples verificação

do valor negativo do VPL, além de uma TIR menor que a TMA estabelecida, inviabilizaram a realização do investimento. O valor uniforme líquido total (VUL) representa os custos anuais atribuídos ao empreendedor caso a opção fosse pela implantação desta tecnologia nas condições desfavoráveis apresentadas.

O cenário III, com geração de energia por meio de turbinas a biogás e venda dos créditos de carbono, se demonstrou economicamente viável para todas as condições testadas. Os elevados valores dos VPLs representaram os lucros totais em valores atualizados que seriam revertidos para o empreendedor na escolha desta tecnologia. Somam-se a este fato, os curtos períodos de tempo necessários para que os investimentos realizados fossem readquiridos: 2,61; 3,14 e 4,78 anos, respectivamente.

Outro demonstrativo da viabilidade econômica dessa tecnologia se refere às taxas internas de retornos calculadas. Para todas as condições, a TIR se apresentou superior à taxa mínima de atratividade de 15% estabelecida para este estudo.

Concentração

Assim como foi utilizado para a tecnologia de biodigestão, nesta etapa utilizou-se como referência uma unidade produtiva padrão de porte mediano com 1,5 milhões de toneladas de cana processada por safra. Os métodos de avaliação econômica e as variáveis utilizadas para a elaboração do fluxo de caixa da biodigestão, também foram aplicados para a tecnologia da concentração.

Contudo, esta tecnologia apresenta uma particularidade quando analisamos a variável “receita do subproduto”, já que está relacionada com a redução dos custos do transporte da vinhaça para aplicação no campo e a economia no consumo de água pela unidade fabril, e não com a venda de

um subproduto específico, como no caso da energia elétrica ou dos créditos de carbono. Portanto, essa redução de custo passa a ser contabilizada como receita pelos empreendedores do setor sucroenergético, viabilizando em muitos casos a implantação da tecnologia de concentração. Outro ganho econômico a ser incluído em análises econômicas futuras está relacionado com o aumento da área fertirrigada devido a maior racionalização na aplicação da vinhaça.

A planta comercial de concentração recomendada para integrar a análise econômica foi a tecnologia ECOVIN®, fornecida pela empresa Citrotec® de Araraquara-SP, modelo CTENET® – 150, com 100 m³.d⁻¹ de vazão afluyente e 38,40 m³.d⁻¹ de vazão efluente, e com taxa de concentração de 70%⁴. Foi considerado no cálculo da viabilidade econômica a economia no transporte e aplicação da vinhaça e a economia no consumo de água

Os resultados da análise mostraram que a concentração se apresenta financeiramente desfavorável para qualquer uma das variáveis econômicas adotadas. Associa-se a esse contexto, o elevado valor presente líquido negativo alcançado por esta tecnologia, representando o prejuízo em valores atuais para o empreendedor que optasse pela realização deste investimento. Soma-se a isso, o valor uniforme líquido total (VUL) que representa os custos anuais atribuídos ao empreendedor caso a opção fosse pela implantação desta tecnologia nas condições desfavoráveis apresentadas. Portanto, o investimento realizado para a implantação do concentrador de vinhaça apenas com a finalidade de reduzir os custos com o transporte e a economia de água se apresenta economicamente inviável para os

⁴ Dados obtidos da Usina Cerradinho, unidade Potirendaba (adaptado pelo autor).

empreendedores do setor sucroenergético.

ANÁLISE DE VIABILIDADE AMBIENTAL

Aplicação *in natura* no solo:

A análise de viabilidade ambiental foi baseada em detalhada revisão da literatura. A utilização inadequada da vinhaça na fertirrigação pode ocasionar uma série de impactos ambientais negativos. A síntese dos principais impactos ambientais potenciais para o uso da vinhaça *in natura* no campo agrícola é apresentada na Tabela 6.

O estado de São Paulo, por meio da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e da Normativa P4.231, se encontra na vanguarda quanto ao gerenciamento adequado desse subproduto, tendo em vista as grandes extensões de terra agricultáveis ocupadas pela cultura da cana de açúcar no estado e os problemas que a falta de uma regulamentação efetiva ocasionava à qualidade ambiental do estado desde meados do século XX. O adequado gerenciamento da aplicação da vinhaça poderá evitar e/ou minimizar a maioria dos impactos apresentados.

No entanto, há questões que ainda estão em discussão, como é o caso da poluição das águas subterrâneas que vem sendo tratada em diversas câmaras técnicas, principalmente no âmbito dos órgãos ambientais reguladores⁵.

⁵ A poluição das águas subterrâneas ainda é um impacto que vem passando por discussões e pesquisas em todos os setores da sociedade. Atualmente, um Grupo de Trabalho foi estruturado no Estado de São Paulo, com representantes do setor sucroenergético (CTC) e do órgão ambiental estadual (CESTEB) a fim de fornecer subsídios definitivos para a prática mais sustentável desta atividade, sem que afete a qualidade das águas subterrâneas.

Tabela 6 - Potenciais impactos ambientais no solo ocasionados pela aplicação da vinhaça *in natura* no solo agrícola

C. Ambiental ¹	Impacto Ambiental	Especificidades e condicionantes (Descrição)
	Alteração da população microbiana ^{3,4}	Desenvolvimento da população de microrganismos (fungos e bactérias), favorecida pelo aporte de matéria orgânica e nutriente.
	Alteração (elevação) do pH ^{3,4}	Redução inicial do pH devido à característica ácida da vinhaça (pH médio em torno de 4) e posterior elevação resultante da ação dos microrganismos.
	Alteração da CTC do solo ^{3,4}	Aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) principalmente pelo aporte de matéria orgânica no solo e, consequente, aumento das cargas negativas;
Solo	Alteração da concentração de íons "nutrientes" disponíveis na solução do solo	Aumento da concentração dos íons de fundamental importância para a nutrição das plantas, como por exemplo, potássio (K ⁺), cálcio (Ca ⁺²) e magnésio (Mg ⁺) que se apresentam em elevadas concentrações na vinhaça.
	Salinização ³	Elevação na concentração de sais no solo pelo uso da vinhaça ao longo dos anos.
	Alteração da estrutura física do solo ³	Melhorias estruturais ocasionadas pela ação de microrganismos que se desenvolvem no ambiente.
	Redução de escavações em jazidas de fertilizantes	Redução das pressões antrópicas sobre os depósitos minerais, através da reutilização dos subprodutos do processo produtivo.

¹C.Ambiental – Compartimento Ambiental, ²Subter. ³Silva, M. (2006); ⁴Brito, F. et al. (2009), ⁵Boddey, R. (2009, Embrapa Agrobiologia).

Tabela 6 - Potenciais impactos ambientais na água ocasionados pela aplicação da vinhaça *in natura* no solo agrícola (contin.)

C. Ambiental ¹	Impacto Ambiental	Especificidades e condicionantes (Descrição)	
Superf. ²	Alteração da carga orgânica	Aumento da carga orgânica nos corpos d'água ocasionada pelo transbordo e arraste da vinhaça dos tanques de armazenamento e canais de transporte, principalmente nos meses mais chuvosos.	
	Alteração da concentração de nutrientes	Aumento da concentração de nutrientes (N, K, Ca e Mg) nos corpos d'água devido ao transbordo e arraste da vinhaça dos tanques de armazenamento e canais de transporte, principalmente nos meses mais chuvosos, potencializando alterações da qualidade da água, por exemplo, no seu padrão de potabilidade.	
	Alteração da concentração de sais	Aumento da concentração de sais dissolvidos (principalmente cloretos) nos corpos d'água devido ao transbordo e arraste da vinhaça dos tanques de armazenamento e canais de transporte, principalmente nos meses mais chuvosos, potencializando alterações da qualidade da água, por exemplo, no seu padrão de potabilidade.	
Água	Alteração da carga orgânica	Aumento da carga orgânica nas águas subterrâneas, carregada por percolação, alterando o padrão de potabilidade da água.	
	Alteração da concentração de nutrientes ⁴	Aumento da concentração de nutrientes (principalmente N e K) nas águas subterrâneas, carregados por percolação, alterando o padrão de potabilidade da água	
	Subter. ²	Alteração da concentração de sais ⁴	Aumento da concentração de sais dissolvidos (principalmente cloretos) nas águas subterrânea, carregados por percolação, alterando o padrão de potabilidade da água.
		Alteração da concentração de nitrato (NO ₃ ⁻)	Aumento da concentração de nitrato nas águas subterrâneas, composto potencialmente causador de doenças, como a metemoglobinemia e outros cânceres.
	Alteração da qualidade da água	Aporte de substâncias solúveis (i.e, sais minerais, compostos orgânicos, etc.) carregadas pela percolação da água da vinhaça, potencializando alterações da qualidade da água (i.e, alteração do padrão de potabilidade).	

¹C.Ambiental – Compartimento Ambiental, ²Superf. – Superficial; Subter. - subterrânea, ³Silva, M. (2006); ⁴Brito, F. et al. (2009), ⁵Boddey, R. (2009, Embrapa Agrobiologia).

Tabela 6- Potenciais impactos ambientais no ar ocasionados pela aplicação da vinhaça *in natura* no solo agrícola (final).

C. Ambiental ¹	Impacto Ambiental	Especificidades e condicionantes (Descrição)
Ar e Outros	Elevação das concentrações de CH ₄ e N ₂ O (GEE) ⁵	Emissões de CH ₄ advindas do processo de anaerobiose de canais de distribuição e reservatórios; emissões de N ₂ O advindas da aplicação ao solo (GEE – gás de efeito estufa).
	Elevação do nível de odor	Dispersão de fortes odores advindos da fertirrigação com vinhaça, afetando as comunidades vizinhas.
	Aumento da incidência de vetores	Atração de vetores (moscas) pela decomposição anaeróbia da vinhaça nos reservatórios e canais.
	Deterioração de pavimentos em rodovias estaduais e estradas vicinais	Sobrecarga causada pelo tráfego intenso de caminhões que realizam o transporte da vinhaça e do maquinário para sua aplicação em longas distâncias.

¹C.Ambiental – Compartimento Ambiental, ²Subter, ³Silva, M. (2006); ⁴Brito, F. et al. (2009), ⁵Boddey, R. (2009, Embrapa Agrobiologia).

Biodigestão

A análise ambiental para a biodigestão foi direcionada à redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) através da conversão do metano (CH₄) em gás carbono (CO₂). Essa conversão ocorre durante a combustão do gás nos queimadores, nas câmaras de combustão dos motogeradores e dos turbogeradores. Portanto, calculou-se para a unidade produtiva padrão, estabelecida como modelo para este estudo, a redução de suas emissões levando em consideração a utilização dos três cenários de aproveitamento do biogás.

Dentre os potenciais impactos ambientais analisados para o caso da aplicação *in natura* no solo, alguns deles tendem a ser mitigados e outros ampliados com a implantação do processo de biodigestão da vinhaça pela unidade fabril. Essa mitigação e/ou ampliação é alcançada, principalmente, pela redução dos compostos orgânicos biodegradáveis existentes e pela menor exposição deste subproduto ao ambiente atmosférico após a sua produção. Os itens a seguir retratam os ganhos potenciais advindos da biodigestão, sendo que suas descrições são apresentadas na Tabela 6:

- Redução do risco de arraste de vinhaça para os corpos d'água superficiais devido ao maior controle sobre este subproduto.
- Mitigação das emissões dos gases de efeito estufa, CH₄ e N₂O, tanto pela menor exposição da vinhaça ao ambiente atmosférico desde sua produção até a sua aplicação quanto pela menor carga orgânica presente neste subproduto pós biodigestão.
- Redução e, em alguns casos, eliminação dos fortes odores advindos da fertirrigação com vinhaça.

Tabela 7 - Redução equivalente das emissões de GEE por tecnologia adotada

Tecnologias	Valor (TCO _{2eq} /ano)
Queimadores	90.056,86
Motogeradores (ciclo Otto)	9.711,90
Turbinas	12.981,57

Fonte: elaboração própria.

- Redução da incidência de vetores.

Dentre essas vantagens, a mitigação das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) aparece como um dos grandes benefícios ambientais desta tecnologia, uma vez que converte gás metano (CH₄) em outros de menor potencial para o aquecimento global.

A Tabela 7 apresenta a quantificação equivalente dos GEEs que deixaram de ser emitidos para cada uma das tecnologias utilizadas como complementação do processo de biodigestão da vinhaça neste estudo.

Nota-se que a utilização dos queimadores aparece como a melhor opção quanto à mitigação dos GEEs. Contudo, esta tecnologia passa a ser preterida pelos empreendedores do setor sucroenergético, tendo em vista a possível complementação do fornecimento de energia elétrica pelos motogeradores e pelas turbinas. Visto isso, a associação dos queimadores às tecnologias de geração de energia é recomendada como a melhor opção, sobretudo naqueles projetos que se utilizam da venda dos créditos de carbono de sua planta industrial.

Ressalta-se que os modelos de quantificação utilizados neste estudo diferem entre si, sendo que para a tecnologia do motogerador e da turbina foi adotada uma metodologia mais conservadora aprovada pelo conselho executivo de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo MDL da ONU (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) no qual se utiliza um conceito de margem combinada para determinar a intensidade de carbono teórica produto da

expansão do setor elétrico nacional. Já para a tecnologia do queimador, quase todo o metano produzido pelo biodigestor foi considerado na conversão para CO₂ (com desconto de 10% de perda pela eficiência da combustão dos queimadores), resultando em valores de mitigação e de créditos de carbono alcançados maiores que os das outras duas tecnologias.

Concentração

Na tecnologia da concentração a análise ambiental se voltou para a racionalização do uso da vinhaça na fertirrigação e pela redução do consumo de água nas plantas industriais que realizam a recirculação dos condensados.

Quanto à racionalização, resultado de aplicação de volumes reduzidos de vinhaça concentrada, essa característica agrega vantagens ambientais das mais diversas formas, desde a redução na utilização de fertilizantes minerais até a mitigação das emissões dos gases de efeito estufa.

Assim como na biodigestão, alguns dos potenciais impactos ambientais analisados para o caso da aplicação *in natura* no solo tendem a ser mitigados ou ampliados com a implantação do processo de concentração da vinhaça pela unidade fabril. Essa mitigação e/ou ampliação é alcançada através da racionalização do uso desse subproduto, resultado direto da redução em seu volume. Os itens a seguir retratam os ganhos potenciais advindos da concentração, sendo suas descrições apresentadas na Tabela 6:

- Redução das pressões antrópicas sobre os depósitos minerais.
- Redução do risco de arraste de vinhaça para os corpos d'água superficiais.
- Redução do risco de percolação da vinhaça para as águas subterrâneas.
- Mitigação das emissões dos gases de efeito estufa, CH₄ e N₂O, tanto pelo menor consumo de combustíveis fósseis e energia elétrica para o transporte e aplicação da vinhaça no campo (caminhões, hidrorolls, bombas de recalque, etc.), quanto pela menor exposição da vinhaça ao ambiente atmosférico desde sua produção até a sua aplicação.
- Redução e, em alguns casos, eliminação dos fortes odores advindos da fertirrigação com vinhaça.
- Redução da incidência de vetores.
- Redução da sobrecarga exercida sobre os pavimentos de rodovias estaduais e estradas vicinais, tanto pelo menor fluxo de caminhões quanto pela implantação de sistemas canalizados para o transporte de vinhaça, sendo este último viabilizado pela redução do volume a ser transportado e consequente redução das dimensões das tubulações e custos associados.

Já no âmbito da redução do consumo de água, calculou-se para a unidade produtiva padrão, estabelecida como modelo para este estudo, a redução anual no consumo de água obtida pela utilização do concentrador de vinhaça e utilização de seu condensado para usos menos exigentes dentro do processo produtivo, por exemplo, a limpeza da cana e dos pisos industriais.

O valor médio de captação e consumo de água adotado neste estudo foi de 1,85 m³/tcm¹ a partir dos parâmetros da usina padrão. A economia que a usina padrão apresentou com uma vazão afluyente para o processo de concentração de 100m³/h (79% do volume de vinhaça produzido) e utilização de 100% do condensado foi de 0,31 m³/tcm, o que significaria a redução da captação média para 1,51 m³/tcm.

Visto o aumento crescente da preocupação mundial com a possível escassez de água e a ampliação da regulação (cobrança) pelo consumo de água no Brasil, a economia obtida com a implantação do processo de concentração surge como um dos principais benefícios dessa tecnologia, cabendo aos empreendedores do setor sucroenergético a função de incluir mais esta variável na análise de viabilidade deste investimento.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Quanto à tecnologia da fertirrigação *in natura*, prática que já vem sendo utilizada há muitos anos no setor, apesar da constatação da sua viabilidade técnica e econômica, esta é uma prática que apresenta potenciais impactos ambientais negativos. As comunidades ao redor das áreas canavieiras convivem com fortes odores nas épocas de aplicação da vinhaça, há risco de poluição de cursos de água e das águas subterrâneas, entre outros; repercutindo negativamente na qualidade de vida desses cidadãos. Portanto, a prática da fertirrigação *in natura* associada a uma das outras tecnologias estudadas (biodigestão e concentração) surge como principal alternativa, uma vez que atua potencializando os benefícios advindos da fertirrigação e mitiga os impactos negativos ocasionados por essa prática. Não se pode esquecer que essa atividade, apesar de todos os potenciais impactos negativos, enquadra-se

como uma prática de reutilização de resíduos agrícolas, atuando na redução da pressão sobre as reservas de fertilizantes minerais e agregando competitividade a um setor de extrema relevância para a economia brasileira.

Em relação à tecnologia da biodigestão, apenas a tecnologia dos motogeradores apresentou um caso pontual de inviabilidade econômica, sendo os turbogeradores aqueles que apresentaram os maiores benefícios para os empreendedores. Contudo, a dificuldade de encontrar fabricantes brasileiros para máquinas geradoras de grande porte, como é o caso das usinas, onera o custo destes investimentos, retraindo possíveis aplicações nesta área. Já no perfil técnico, os três cenários se apresentaram altamente viáveis, uma vez que todas as tecnologias estudadas se encontram disponíveis no mercado e em utilização por usinas e destilarias, mesmo que de forma reduzida. No âmbito ambiental, todos os projetos de biodigestão confirmaram os seus vieses positivos, sobretudo pela sua contribuição à mitigação do aquecimento global pela redução das emissões dos gases de efeito estufa.

A tecnologia da concentração da vinhaça se apresentou como o caso mais complexo analisado neste trabalho. Apesar da sua incontestável viabilidade técnica e ambiental, justificadas pela diversificada oferta desta tecnologia no mercado especializado, pela sua crescente utilização por parte das usinas e destilarias e pelo padrão de sustentabilidade conferido às unidades industriais que optam pela sua utilização; no âmbito econômico os resultados não se apresentam tão favoráveis. Dentre as tecnologias que se demonstraram inviáveis economicamente, a concentração foi a que apresentou as condições mais desfavoráveis para a sua implementação. Contudo, a incorporação progressiva desta tecnologia nas unidades

¹ tcm: tonelada de cana moída

Tabela 8 – Síntese da análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental para aproveitamento da vinhaça.

Tecnologias	Viabilidade Técnica	Viabilidade Econômica	Viabilidade Ambiental
Aplicação <i>in natura</i>	Viável	Viável	Viável, adotando-se boas práticas na aplicação
Biodigestão	Viável	Viável, exceto para motogeradores (cenário II) a preços do Leilão A3-2011	Viável, sendo os queimadores a melhor opção para redução de GEE
Concentração	Viável	Inviável	Viável, disponibiliza água para o processo produtivo (0,31m ³ /tcm em uma usina padrão)

Fonte: elaboração própria.

agroindustriais brasileiras caminha na contramão dos resultados encontrados neste estudo. Essa divergência pode ter sido alcançada devido ao modelo utilizado para a valoração dos benefícios econômicos obtidos por esta tecnologia (economia com transportes e com o consumo de água). Portanto, recomenda-se que seja realizado um estudo de caso específico, sendo importante pormenorizar os benefícios obtidos com a redução do transporte, uma vez que esse item representa o custo mais oneroso da prática de fertirrigação e os volumes a serem aplicados são reduzidos significativamente; além dos benefícios obtidos com a recirculação da água retirada da vinhaça. A Tabela 8 apresenta a síntese dos resultados dessa pesquisa.

Em vista da generalidade assumida para alguns parâmetros deste estudo, não se espera, como de início, que ele sirva de parâmetro final para a tomada de decisão em investimentos futuros do setor. Contudo, pretende-se que a pesquisa seja utilizada com uma base sólida para estudos de caso mais complexos exigidos pelo tema, haja vista a importância dessas decisões no futuro e longevidade dos empreendimentos do setor sucroenergético.

CONCLUSÕES

Nesse estudo foi possível verificar que há viabilidade técnica e

ambiental para o uso da vinhaça *in natura*, para biodigestão, e concentração, no entanto, a viabilidade econômica só teve resultados positivos para aplicação *in natura* e biodigestão sendo que os preços dos leilões para energia renováveis influenciam diretamente e podem tornar seu uso inviável.

Apesar de a fertirrigação *in natura* ser o destino mais empregado para a vinhaça gerada em usinas de cana-de-açúcar, esse uso pode ser considerado menos eficiente que a biodigestão e a concentração. Isso porque a fertirrigação subutiliza a matéria orgânica com potencial para a geração de energia elétrica, subutiliza elevados volumes de água com potencial de reutilização no processo industrial, e não utiliza a energia térmica com potencial de utilização em outras etapas do processo industrial que se utilizam de calor.

A despeito das vantagens nutricionais para a cultura comprovado por muitos estudos científicos acerca da fertirrigação *in natura*, nota-se que parte considerável das unidades agroindustriais e destilarias do estado de São Paulo ainda não investem na potencialização do uso de seus subprodutos, seja pela falta de um setor de pesquisa e desenvolvimento em sua estrutura empresarial ou pela falta de capital/crédito para o investimento nessas novas tecnologias. Portanto, rotineiramente, experiências passadas desenvolvidas de forma

equivocada sob grande especificidade do local pesquisado e/ou utilizando conhecimentos ultrapassados se tornam justificativas para a não adoção de novas tecnologias.

Quanto ao uso de biodigestores associados a tecnologias geradoras de energia elétrica, é possível verificar que há pouca difusão no setor. A geração de energia elétrica por usinas é feita preferencialmente por cogeração a partir do bagaço de cana, abundante nas usinas. Os projetos que se utilizam do biogás dos biodigestores para geração de energia não estavam presentes nos leilões de energia de fontes renováveis (A-3) mais recentes, desestimulando investimentos nesses projetos. Ainda assim, a adoção da biodigestão pode ser desenvolvida em parceria com concessionárias de energia elétrica, como já ocorre na cogeração pelo bagaço da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Essas parcerias trazem benefícios tanto para a usina, por meio do aumento da produção de energética elétrica e da possibilidade de modernização de seu parque industrial, quanto para as concessionárias que veem a possibilidade de aumentar a oferta de energia elétrica em suas redes de distribuição, especialmente importantes em áreas com maior representatividade de termelétricas movidas a combustíveis fósseis.

Uma característica comum às unidades agroindustriais visitadas que não apresentaram projetos referentes à biodigestão da vinhaça

foi a falta de argumentos que inviabilizassem a utilização dessa tecnologia. A maioria das justificativas baseava-se em experiências passadas consideradas mal sucedidas, que apresentavam um nível tecnológico diferente do atual e que não deixaram significativo aporte de documentação (artigos, publicações e relatórios) que retratasse os motivos da interrupção de sua atividade. Os gestores desses empreendimentos, por meio de simples especulações, adotaram um posicionamento negativo quanto à viabilidade dessa tecnologia, demonstrado mais uma vez a ausência ou, ao menos, a ineficiência de seus setores de P&D.

Por fim, quanto à concentração, apesar da sua incontestável viabilidade técnica e ambiental do ponto de vista econômico, os resultados não foram favoráveis. Dentre as tecnologias que se demonstraram inviáveis economicamente, a concentração foi a que apresentou as condições mais desfavoráveis para a sua implementação. No entanto, considerando sua aplicação crescente, devem ser avaliados, caso a caso, os parâmetros econômicos aplicados neste estudo.

Outra questão relevante é que as tecnologias que reduzem a produção de vinhaça passaram a vigorar como a primeira opção no gerenciamento desse subproduto, uma vez que se torna mais sensato investir na redução da produção do que na remediação pós-produção. Uma dessas tecnologias, já disponível no mercado, tem como princípio básico a fermentação com teor alcoólico elevado (até 16%) em associação com leveduras adaptadas a essa condição, proporcionando uma menor relação de litros vinhaça por litro de etanol produzido. Dentre as vantagens destacadas estão, além da redução na produção de vinhaça, a economia de água e insumos químicos (antibióticos, ácidos e antiespumantes), sem que haja perdas de nutrientes para a vinhaça.

Apesar de a concentração parecer ter sido preterida, provisoriamente, por estas novas tecnologias, não se pode descartar o seu potencial de aplicação e, sobretudo, uma possível aplicação conjunta dessas tecnologias a fim de ampliar a eficiência na redução do volume de produção, facilitando o manejo e o retorno da vinhaça à lavoura.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudos aos pesquisadores Luiz Felipe Lomanto Santa Cruz e Carla Grigoletto Duarte e bolsa de produtividade em pesquisa a Eduardo Cleto Pires. À FAPESP pelo financiamento de projetos temáticos que permitiram a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALBERS, Mônica. **Tratamento da vinhaça**: concentração e outros. Workshop Tecnológico sobre Vinhaça. Jaboticabal, 10/10/2007. Disponível em <http://www.apta.sp.gov.br/cana/a_nexos/Position_paper_sessao4_monica_VS.pdf>. Acesso em 15 de maio de 2012.
- ANDRADE, J. **Construção de um Índice de Sustentabilidade Ambiental para a Agroindústria Paulista de Cana-de-Açúcar [ISAAC]**. 2009, 259 p. Dissertação (Mestrado Profissional). Escola de Economia de São Paulo, Faculdade Getúlio Vargas, São Paulo, 2009.
- BANCO CENTRAL BRASILEIRO. Histórico das taxas de juros fixadas pelo Copom e evolução da taxa Selic. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/?COPOMJURO>>. Acesso em: 22 de ago. de 2011.
- BODDEY, R. et al. **Circular técnica**: mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil.

Seropédica-RJ: Embrapa-RJ, 2009. 14 p.

BRITO, F. et al. Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.4, p.456-462, out/dez. 2009.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar. 3º levantamento, janeiro/2011. Brasília: 2011

CRUZ, L. F. L. S. **Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o setor sucroenergético do Estado de São Paulo**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A. As boas práticas industriais. In: ANA; FIESP; UNICA; CTC. **Manual de Conservação e Reúso de Água na Agroindústria Sucroenergética**. Brasília: Agência Nacional das Águas, 2009. Capítulo 6, p.183-256.

FIGUEIREDO, P; CORTEZ, L. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO, L. et al. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 31-44.

FREIRE, W. J; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. (Série Engenharia Agrícola).

LUZ, P.H.C. Novas tecnologias no uso da vinhaça e alguns aspectos legais. II Simpósio de Tecnologia de Produção de Cana-de-Açúcar. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2005.

MADEJÓN, E, et al. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). **Agriculture, Ecosystems**

and Environment, v. 84, n.1, p.55-65, 2001.

ROSSETTO, R. et al. Potássio. In: DINARDO, L. et al. **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. P. 289-312.

SALOMON, K. R. Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá. 2007.

SILVA, M.; GRIEBELER, N.; BORGES, L. Uso da vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.11, n.1, p. 108-114, 2006.

SILVA, M.; GRIEBELER, N.; BORGES, L. Uso da vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.11, n.1, p. 108-114, 2006.

Recebido em: ago/2012

Aprovado em: out/2013