UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

TECNOLOGIA PARA APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA COMO BIOFERTILIZANTE ORGANOMINERAL GRANULADO

MARCILIO NOGUEIRA DO AMARAL GURGEL

CAMPINAS – SP
JUNHO DE 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

TECNOLOGIA PARA APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA COMO BIOFERTILIZANTE ORGANOMINERAL GRANULADO

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola na área de concentração em Água e Solos.

MARCILIO NOGUEIRA DO AMARAL GURGEL
Orientador: Durval Rodrigues de Paula Júnior

CAMPINAS – SP
JUNHO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

G962t

Gurgel, Marcilio Nogueira do Amaral
Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado / Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Durval Rodrigues de Paula Júnior.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Biofertilizantes. 2. Vinhaça. 3. Agroindústrias canavieira. 4. Resíduos organicos como fertilizantes. 5. Torta de filtro. I. Paula Júnior, Durval Rodrigues de, 1953-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Technology utilization of waste from sugarcane industry as organomineral biofertilizer granules
Palavras-chave em Inglês: Biofertilizer, Vinasse, Agroindustrias sugarcane, Organic waste as fertilizer, Filter cake
Área de concentração: Água e Solo
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola
Banca examinadora: Nilson Antonio Modesto Arraes, Denis Miguel Roston, Durval Dourado Neto, Nélia Henriques Callado
Data da defesa: 25-06-2012
Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Marcilio Nogueira do Amaral Gurgel,** aprovada pela Comissão Julgadora em 25 de junho de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Prof. Dr. Durval Rodrigues de Paula Junior – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp

Profa. Dra. Nélia Henriques Callado - Membro Titular
UFAL

Prof. Dr. Durval Dourado Neto - Membro Titular
Esalq/USP

Prof. Dr. Denis Miguel Roston - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Prof. Dr. Nilson Antonio Modesto Arraes - Membro Titular
Feagri/Unicamp

FEAGRI
Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Jose Theóphilo e Yolanda,

À minha família – Maria Rachel, Cristiano, Isabella e Felipe, e

A Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Ao professor Dr. Durval Rodrigues de Paula Júnior, pela orientação segura, ensinamentos e pela amizade;

Aos engenheiros Antônio Rogério Pereira César, Fernando César Boscariol, Sergio Tamassia Barreira, José Luiz Olivério, a Diretoria Executiva e Acionistas da Dedini S/A Indústrias de Base de Piracicaba, pelo apoio;

Às engenheiras agrônomas Simone Toni Ruiz e Dra. Gláucia Regina Anti e aos professores Dr. Quirino Augusto de Camargo Carmello e Dr. Durval Dourado Neto da Esalq/Usp, pela preciosa contribuição e colaboração;

Ao Dr. Carlos Franco Júnior, pelo incentivo;

Aos meus amigos, pelo apoio e amizade; e

A todos aqueles que colaboraram para a concretização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE TABELAS x
LISTA DE ABREVIATURAS xi
LISTA DE SÍMBOLOS xii
RESUMO xiv
ABSTRACT xv
1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 4
2.1 OBJETIVO GERAL 4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
3.1 CLASSIFICAÇÃO, ORIGEM E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICO DA CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL 5
3.2 PROCESSO PRODUTIVO DA CANA DE AÇÚCAR PARA FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL 6
3.2.1 MATÉRIA-PRIMA: COMPOSIÇÃO E CONSTITUINTES 7
3.2.2 TRANSPORTE, PESAGEM, DESCARREGAMENTO E ESTOCAGEM 9
3.2.3 A LAVAGEM E O PREPARO DA CANA DE AÇÚCAR 12
3.2.4 LIMPEZA A SECO 14
3.2.5 EXTRAÇÃO E TRATAMENTO PRIMÁRIO DO CALDO 16
3.2.6 PRODUÇÃO DE AÇÚCAR 19
3.2.7 PRODUÇÃO DE ETANOL 22
3.2.8 GERAÇÃO DE ENERGIA 24
3.3 ASPECTOS AMBIENTAIS DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA 26
3.4 RESÍDUOS 26
3.4.1 VINHAÇA 27
3.4.1.1 HISTÓRICO DE DESTINAÇÃO DA VINHAÇA 30
3.4.1.2 APLICAÇÃO DE VINHAÇA EM ÁREAS DE PLANTIO DE CANA DE AÇÚCAR 31

3.4.2 TORTA DE FILTRO....34
3.4.3 BAGAÇO....37
3.4.4 FULIGEM E CINZAS DE CALDEIRAS....39
3.4.5 OUTROS RESÍDUOS SÓLIDOS....40
3.5 CONCENTRAÇÃO DA VINHAÇA....43
3.6 A ÁGUA NO PROCESSO DE AÇÚCAR E ETANOL....52
3.7 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL....54
3.7.1 APLICAÇÃO DE VINHAÇA EM SOLO AGRÍCOLA E O USO DAS ÁGUAS....55
3.8 BIOFERTILIZANTE ORGANOMINERAL (BIOFOM)....56
4. MATERIAL E MÉTODOS....60
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL....61
4.2 PREPARO DO BIOFOM....64
4.3 PREPARAÇÃO DOS VASOS....67
4.4 ANÁLISE DO POTENCIAL AGRONÔMICO....68
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO....69
5.1 CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL AGRONÔMICO DO BIOFOM....69
5.1.1 ÁREA FOLIAR E MASSA DO MATERIAL SECO DA PARTE AÉREA DAS PLANTAS....74
5.1.2 ACÚMULO DE NUTRIENTES NA PARTE AÉREA DAS PLANTAS....77
5.1.2.1 MACRONUTRIENTES....79
5.1.2.2 MICRONUTRIENTES....81
5.1.3 MASSA DO MATERIAL SECO DE RAÍZES....85
5.1.3.1 MACRONUTRIENTES....87
5.1.3.2 MICRONUTRIENTES....91
5.1.4 ANÁLISE DE TERRA DOS VASOS....94
5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS....104
5.3 RECOMENDAÇÕES PARA NOVAS PESQUISAS....107
6. CONCLUSÕES....108
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS....109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma básico de fabricação de açúcar e álcool (etanol) 7
Figura 2 - Guindaste Hilo para cana inteira (A) e para cana picada (B) 10
Figura 3 - Ponte rolante com garras para cana inteira 11
Figura 4 - Descarga lateral em mesa rebaixada 11
Figura 5 - Visão de um conjunto de moagem (5 ternos) 14
Figura 6 - Detalhes do sistema de limpeza a seco da cana de açúcar (A, B e C: vista geral; D: mesa de 45° para recepção da cana de açúcar) 16
Figura 7 - Fluxograma das etapas de fabricação do açúcar 22
Figura 8 - Fluxograma das etapas de fabricação do etanol 24
Figura 9 - Fluxograma da produção de Açúcar, Etanol, Bioeletricidade e Resíduos. 27
Figura 10 - Detalhe do canal condutor de vinhaça - motobomba acoplada ao carretel irrigador 32
Figura 11 - Aplicação de vinhaça por aspersão através de um conjunto motobomba instalado ao longo de um canal 33
Figura 12 - Aplicação de vinhaça por aspersão através de carretel irrigador acoplado a um caminhão-tanque 34
Figura 13 - Distribuição da vinhaça por meio de caminhão-chuveiro 34
Figura 14 - Retirada da torta do filtro – prensa 35
Figura 15 - Compostagem da torta de filtro 36
Figura 16 - Aplicação da torta de filtro no sulco de plantio 36
Figura 17 - (A) Compostagem das cinzas da caldeira (cor preta) com a torta de filtro (cor marrom) e; (B) Descarregamento das cinzas da caldeira na lavoura 39
Figura 18 - Detalhe da vinhaça concentrada 43
Figura 19 - Raio econômico de aplicação da vinhaça x Concentração x Redução do volume .. 44
Figura 20 - (A) Aplicação de vinhaça concentrada e; (B) Detalhe da vinhaça concentrada aplicada na cana 45
Figura 21 - Esquema típico de um evaporador 46
Figura 22 - Esquema ilustrativo de um evaporador de múltiplo efeito 47
Figura 23 - Evaporador do tipo névoa turbulenta 50
Figura 24 - Concentração da vinhaça com integração energética com a destilaria 51
Figura 25 - Visão geral do concentrador de vinhaça com integração energética 52

Figura 26 - BIOFOM 58
Figura 27 - Esquema ilustrativo da planta de produção do fertilizante organomineral (BIOFOM – N, P, K) 59
Figura 28 - Casa de vegetação da ESALQ-USP, utilizada no experimento 60
Figura 29 - Ilustração dos tratamentos realizados 61
Figura 30 - Distribuição aleatória dos blocos com os tratamentos 62
Figura 31 - Preparo dos vasos com 2,5 L de capacidade semeados com 2 sementes de milho cada. A) Vaso com saco plástico para evitar perdas de água e nutrientes por lixiviação. Volume 2,5 L=2 kg solo; B) Grânulos de BIOFOM e Adubo sendo homogeneizados no solo (da metade inferior do vaso); C) Preenchimento do restante do vaso com solo (metade superior do vaso); D) Semente de milho utilizada no experimento – DOW 2B710 67
Figura 32 - (A) Detalhe de plantas de milho 5 dias após a emergência (DAE) e enraizamento; (B) Plantas de milho no 5 DAE. 71
Figura 33 - Plantas de milho 8 após a emergência (DAE) – desbaste 72
Figura 34 - Plantas de milho 12 dias após a emergência (DAE) 72
Figura 35 - Plantas de milho 20 dias após a emergência (DAE) 73
Figura 36 - Plantas de milho 50 dias após a emergência (DAE) 73
Figura 37 - Evolução no desenvolvimento das plantas de milho (plantio – A e C e colheita – B e D) – testemunha e tratamento com BIOFOM 76
Figura 38 - Comparativo entre o desenvolvimento de plantas de milho submetidas a diferentes tratamentos: Testemunha, BIOFOM e Mineral 77
Figura 39 - (A) Detalhes das raízes da planta de milho submetidas aos tratamentos com BIOFOM. (B) BIOFOM remanescente nas raízes do milho 87
Figura 40 - Comparação entre adubo mineral e BIOFOM. 105
Figura 41 - Raíz de Milho com BIOFOM aderido. 106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média da cana de açúcar 8
Tabela 2 - Principais constituintes da cana de açúcar 9
Tabela 3 - Caracterização físico-química da vinhaça 28
Tabela 4 - Composição físico-química da torta de filtro 37
Tabela 5 - Características do bagaço 38
Tabela 6 - Composição química de cinzas e fuligem 39
Tabela 7 - Resíduos sólidos da indústria sucroalcooleira 42
Tabela 8 - Teores de nutrientes nas vinhaças concentradas e *in natura* 44
Tabela 9 – Uso médio da água: unidades produtoras de açúcar e etanol 53
Tabela 10 - Tratamentos do experimento de avaliação do BIOFOM com milho (planta *teste*) 63
Tabela 11 - Quantidade de nutrientes (g $vaso^{-1}$) presentes nos diferentes tratamentos de BIOFOM e vinhaça 65
Tabela 12 - Análise da terra utilizada no experimento, antes e após a calagem 66
Tabela 13 - Análise físico-química dos biofertilizantes organominerais (BIOFOM) utilizados 69
Tabela 14 - Análise granulométrica dos biofertilizantes organominerais (BIOFOM) utilizados 70
Tabela 15 - Área foliar (AF) e massa de material seco da parte aérea das plantas de milho (MMSpa) e respectivos testes de *Tukey* 74
Tabela 16 - Acúmulo de macronutrientes (mg $planta^{-1}$) na parte aérea das plantas de milho e respectivos testes de *Tukey* 78
Tabela 17 - Acúmulo de micronutrientes (µg $planta^{-1}$) na parte aérea das plantas de milho e respectivos testes de *Tukey* 82
Tabela 18 - Massa de material seco das raízes das plantas de milho (MMSra) e respectivos testes de *Tukey* 86
Tabela 19 - Acúmulo de macronutrientes (mg $planta^{-1}$) nas raízes das plantas de milho e respectivos testes de *Tukey* 88
Tabela 20 - Acúmulo de micronutrientes (µg $planta^{-1}$) nas raízes das plantas de milho e respectivos testes de *Tukey* 92
Tabela 21 - Análise da terra dos vasos após colheita do experimento e respectivos testes de *Tukey* 95

LISTA DE ABREVIATURAS

AF - Área foliar

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BO - Balanço de Oxigênio

BIOFOM - Biofertilizante Organomineral

ºBRIX - Quantidade de compostos solúveis numa solução de sacarose

CIP - *Cleaning In Place*

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CMMAD - Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira

DAE - Dias Após Emergência

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DDS - Danske Sukkerfabrikker S/A

d.m.s. - Diferença Mínima Significativa

DSM - Dutch State Mines

IAA - Instituto de Açúcar e Etanol

MMSpa - Massa de matéria seca de parte aérea

MMSra - Massa de matéria seca de raiz

OD - Oxigênio Dissolvido

ONU - Organização das Nações Unidas

pH - Potencial Hidrogeniônico

PROETANOL - Programa Nacional do Etanol

ÚNICA - União da Indústria de Cana de Açúcar

LISTA DE SÍMBOLOS

°Be - graus Baumé

°Brix - graus Brix

°C - graus centigrados

CTC - capacidade de troca catiônica

cm - centímetros

cm^2 $planta^{-1}$ - centímetros quadrados por planta

cv – cavalo-vapor

DAE - dias após emergência

f‘ - fibra % de bagaço

ºGL - graus Gay Lussac

g - gramas

g $vaso^{-1}$ - miligramas por vaso

h - hora

kg - quilograma

kg m^{-3} - quilogramas por metro cúbico

kgf cm^{-2} - quilograma força por centímetro quadrado

kW - quilowatt

L L^{-1} - litros por litros

mg L^{-1} - miligramas por litro

mg Nm^{-3} – miligrama por normal metro cúbico

mg $planta^{-1}$ - miligramas por planta

µg $planta^{-1}$ - microgramas por planta

mL L^{-1} - mililitros por litro

m^3 - metros cúbicos

m^3 dia^{-1} - metros cúbicos por dia

m^3 h^{-1} - metros cúbicos por hora

mm - milímetro

s - segundo

ST - sólidos totais

t - tonelada

$t\ h^{-1}$ - toneladas por hora

v/v - volume por volume

RESUMO

Com o objetivo de propor uma tecnologia para utilização de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como vantagens do processo de concentração da vinhaça, avaliou-se o biofertilizante organomineral (BIOFOM). O BIOFOM é formulado com vinhaça concentrada, torta de filtro, cinzas de caldeira e fuligem das chaminés e complementado com fertilizantes minerais, para a obtenção de formulações equivalentes às utilizadas na adubação convencional da cana de açúcar. O estudo contemplou a caracterização e análise do potencial agronômico em um Estudo de Caso envolvendo uma planta teste (milho), observando as diferenças entre os tratamentos (adubação com fertilizante mineral *versus* adubação com BIOFOM), até 45 dias após a semeadura. O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo (Universidade de São Paulo), em Piracicaba, SP, em 2008. A tecnologia adotada para concentrar a vinhaça baseou-se na evaporação do resíduo pelo processo de 'névoa turbulenta', com elevados coeficientes de troca térmica. Nesse processo, os evaporadores são de múltiplo efeito a vácuo, integrado ao processo industrial, sendo que esses evaporadores utilizam diversas fontes de calor já disponíveis na usina. O volume de vinhaça gerado diminui sobremaneira, sem aumento do consumo de vapor da destilaria. O biofertilizante organomineral (BIOFOM) foi originado desse processo, que pode ser formulado de acordo com as necessidades da cultura. Observou-se que o BIOFOM pode substituir, a utilização do fertilizante mineral, sendo que alguns tratamentos tiveram o mesmo desempenho do fertilizante mineral. O produto reduz a geração de resíduos da agroindústria sucroalcooleira, aproveitando-os racionalmente, além de contemplar a legislação ambiental vigente.

Palavras Chave: Biofertilizantes, Vinhaça, Agroindústrias canavieira, Resíduos orgânicos como fertilizantes, Torta de filtro.

ABSTRACT

With the purpose of proposing a technology to use waste from sugarcane industry as advantages of the vinasse concentration process, the organomineral biofertilizer BIOFOM was evaluated. The BIOFOM is made with concentrated stillage, filter cake, boiler ash and soot from chimneys and supplemented with mineral fertilizers, to obtain formulations equivalent to those used in conventional fertilization of sugarcane. The study included the characterization and analysis of agronomic potential in a case study involving a plant test (corn), noting the differences among treatments (fertilization with mineral fertilizers *versus* BIOFOM fertilization) until 45 days after sowing. The experiment was carried out in a greenhouse at the Soil Science Department (University of São Paulo), in Piracicaba, SP, in 2008. The technology used was based on the vinasse evaporation through 'Turbulent Mist', with high heat transfer coefficients. In this process the multiple effect vacuum evaporators are integrated into the manufacturing process, and these evaporators use different heat sources already available in the mill. The volume of stillage generated is reduced significantly without increasing the consumption of steam in the distillery. This process originated the organomineral biofertilizer (BIOFOM), which can be formulated according to the needs of the crop. It was observed that the BIOFOM replaced, in many cases, the use of a mineral fertilizer, and some treatments had similar pattern of the mineral fertilizer. That organomineral biofertilizer reduces the waste generation from the sugarcane industry, using it rationally, and also contemplates the environmental regulations.

Key Words: Biofertilizer, Vinasse, Agroindustrias sugarcane, Organic waste as fertilizer, Filter cake.

1 INTRODUÇÃO

O modelo agrícola adotado em uma determinada região antes ocupada por um ecossistema natural qualquer é o principal responsável pelo impacto ambiental nessa área (CAMPANHOLA et al., 2001). A diminuição dos impactos ambientais de uma região, ou de um processo produtivo, seja ele agrícola ou industrial, deve basear-se em políticas que priorizem o "desenvolvimento sustentável", ressaltando suas preocupações com o crescimento econômico, justiça social e preservação ambiental – visões estas preconizadas, na década de 80, pelo "ecossocioeconomista" Ignacy Sachs.

O termo "desenvolvimento sustentável" possui diversas definições, dentre as quais a utilizada pelo governo brasileiro foi a definida no trabalho da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), criada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1983. O Relatório Brundtland, como também é conhecido pela homenagem à sua presidente (Gro Harlem Brundtland), foi publicado em 1987, e mostra parte de uma visão complexa das causas dos problemas sociais, econômicos e ecológicos da sociedade mundial, apresentando uma série de medidas a serem tomadas quanto à responsabilidade das nações com o meio ambiente, a incompatibilidade entre "desenvolvimento sustentável" e os padrões de produção/consumo vigentes nos países industrializados e, principalmente, com as gerações futuras. Conforme esse relatório, que é anterior à Agenda-21, "desenvolvimento sustentável" é definido como *"o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades"*.

No caso da agricultura canavieira, a notável expansão em suas atividades foi impulsionada, primeiramente, pelo Programa Nacional do Etanol (PROETANOL). Esse programa foi criado em 14 de novembro de 1975 pelo decreto n° 76.593, cujo objetivo era estimular a produção do etanol, visando o atendimento das necessidades do mercado interno e externo e da política de combustíveis automotivos (FRACARO, 2005). Este programa propiciou melhoramento e expansão da oferta de matéria prima, com ênfase especial no aumento da produção agrícola, na modernização e ampliação das usinas já existentes e ainda na instalação de novas unidades (MENEGHETTI, 2007). Sendo assim, a partir desta data uma grande expansão da atividade sucroalcooleira foi promovida no Brasil, bem como sua concentração em determinadas faixas e regiões agrícolas, principalmente em áreas do Estado de São Paulo. O segundo grande impulso no setor sucroalcooleiro foi a introdução dos

veículos *flex-fuel*, em 2003, e do movimento mundial pró-uso de combustíveis renováveis, a partir de meados dos anos 2000 (RAMOS, 2007).

A preocupação com a questão ambiental, contudo, não recebeu a mesma preocupação que o aumento de produção. Fatores essenciais para um desenvolvimento sustentável da agricultura canavieira nunca foram levados em conta e, embora seja indiscutível o avanço ambiental trazido pela substituição de parte do combustível fóssil por etanol, principalmente nos grandes centros urbanos, não se pode dizer o mesmo dos impactos ecológicos de seu processo produtivo. A ampliação dos canaviais para a produção de etanol acarretou na intensificação de grandes problemas ambientais: a degradação de ecossistemas; a poluição atmosférica causada pelas queimadas e a poluição de cursos d'água e do lençol freático causado pela aplicação excessiva da vinhaça *in natura* (SZMRECSÁNYI, 1994).

No cenário brasileiro, a cana de açúcar ocupa, hoje, cerca de 8 milhões de hectares, ou cerca de 2,3% de toda a terra arável do país, que é o maior produtor mundial, seguido por Índia, Tailândia e Austrália. Projeções ainda indicam que o país deverá produzir, em 2020, aproximadamente 1 bilhão de toneladas de cana de açúcar, frente aos 598 milhões produzidos na safra 2009/2010 (UNICA 2011).

Sendo muito volumosa a produção de resíduos do beneficiamento da cana de açúcar, tanto para o etanol quanto para o açúcar, a busca de tecnologias apropriadas para promover o gerenciamento, tratamento e aproveitamento dos mesmos constitui-se fator determinante para um desenvolvimento ambientalmente sustentável do complexo agroindustrial sucroalcooleiro. Quando os resíduos industriais não são bem gerenciados, aumentam sobremaneira os riscos de problemas ao meio ambiente, contudo, quando bem utilizados, diminuem significativamente os custos de produção, melhoram a imagem da empresa e as perspectivas de negócios e, principalmente, diminuem os riscos de danos ambientais.

Algumas experiências bem sucedidas na gestão de resíduos das usinas e destilarias mostram que a torta de filtro, material orgânico sólido obtido da produção de açúcar, tem sido usada na adubação dos canaviais; o bagaço da cana, que já vinha sendo utilizado na geração de energia nas unidades industriais, passou a ser, também, usado nos últimos anos na cogeração de energia, permitindo que usinas e destilarias não consumissem energia elétrica das redes de distribuição; a vinhaça, efluente da fabricação de etanol por via fermentativa, que antes era lançada diretamente nos rios, causando grandes problemas ambientais, hoje é, em grande

parte, aproveitada para irrigar e fertilizar lavouras de cana de açúcar. Há de se ressaltar que a utilização de resíduos merece atenção quanto a possíveis problemas de degradação e contaminação do solo e da água (SPADOTTO, 2008).

É importante ressaltar que a gestão de resíduos vai muito além da "reutilização" de insumos. Uma modificação no sistema de produção pode representar uma grande redução na produção de resíduos. Ao mesmo tempo, faz-se necessária a visão geral que identifique as possibilidades de integração e, de forma complementar, a visão especialista que permita o entendimento e a modificação dos sistemas de produção. Fica evidente a necessidade de formação e treinamento de recursos humanos para o país enfrentar os desafios da gestão de resíduos como parte do negócio, considerando os aspectos econômicos, ecológicos e sociais (SPADOTTO, 2008).

As pressões ambientais por parte dos órgãos ligados ao meio ambiente, somadas ao aumento dos preços dos fertilizantes, alavancaram o desenvolvimento de novas tecnologias para a produção agrícola de forma sustentável. Neste contexto, este trabalho propõe avaliar um biofertilizante organomineral (BIOFOM), produzido com os resíduos da agroindústria sucroalcooleira (vinhaça concentrada, torta de filtro, cinzas de caldeira e fuligem das chaminés), e complementado com fertilizantes minerais, para a obtenção de formulações equivalentes às utilizadas na adubação convencional da cana de açúcar.

O conhecimento da eficiência agronômica de um fertilizante é fundamental para se efetuar o cálculo correto da adubação das culturas. Com esse intuito foi realizado, na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz" (ESALQ-USP) de Piracicaba, SP, um experimento com o objetivo de avaliar e quantificar o efeito do biofertilizante organomineral (denominado BIOFOM) em plantas de milho (planta teste), observando as diferenças entre os tratamentos (adubação com fertilizante mineral x adubação com o BIOFOM), até 45 dias após o plantio.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Propor uma tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como fertilizante organomineral granulado.

2.2 Objetivos específicos

a) Caracterização do BIOFOM (biofertilizante organomineral) com diferentes tratamentos, formulações e complementos.
b) Análise do potencial agronômico do BIOFOM (biofertilizante organomineral) em um estudo de caso (planta teste: milho), utilizando como referência a massa de matéria seca da parte aérea.
c) Análise do BIOFOM (biofertilizante organomineral) quanto à substituição, parcial ou total, do adubo químico, utilizando o milho como planta teste.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Classificação, origem e importância socioeconômico da cana de açúcar no Brasil

A cana de açúcar é uma planta semiperene, monocotiledônea, alógama da família Poaceae, do gênero *Saccharum*, cujas constituições genéticas participam: *Saccharum officinarum, Saccharum spontaneum, Saccharum sinense, Saccharum barberi* e *Saccharum robustum* (MATSUOKA, 1996; MATSUOKA et al., 1999). Sendo assim, os cultivares modernos são híbridos interespecíficos de *Saccharum* spp. (GLAZ, 2002).

A origem provável da cana de açúcar data de 6000 anos a.C., na região do sudeste asiático (Nova Guiné e Indonésia), sendo esta uma planta de clima tropical e subtropical (ARANHA e YAHN, 1987). A cana de açúcar foi introduzida no Brasil pelos Portugueses logo, após o descobrimento, em duas diferentes regiões: nordeste (estado de Pernambuco) e sudeste (estado de São Paulo) (BRAUNBECK e CORTEZ, 2005). Contudo, foi somente a partir da segunda metade do século XVI, quando os engenhos do nordeste brasileiro passaram a operar em Pernambuco, Bahia, Alagoas, Sergipe e Paraíba, que a cultura ganhou importância econômica. No século XVII, a produção de cana de açúcar se expandiu para o Pará e Amazonas (onde os engenhos orientaram-se para a produção de cachaça), chegando em seguida ao Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. Neste período, a cultura atendia perfeitamente à estratégia de Portugal, associando a ocupação intensa da colônia e a produção de um item altamente lucrativo para a metrópole na Europa (CANABRAVA, 2005).

No século XIX, a expansão dos polos produtores de açúcar pelo mundo reduziu a importância do Brasil no mercado mundial, comprometendo assim a viabilidade econômica da atividade do país. Neste período, São Paulo e Rio de Janeiro se firmaram como polos fornecedores para as regiões Sul e Sudeste. Na década de 1930 (início do governo Vargas) foi criado o Instituto de Açúcar e Etanol (IAA), com a finalidade de regular a produção interna e desenvolver pesquisas sobre a cultura. Devido à grande crise do petróleo de 1973, o Brasil iniciou, em 1975, o Programa Nacional do Etanol (PROETANOL), com o objetivo de inserir o etanol na matriz energética brasileira. Vale lembrar que neste mesmo governo foi realizado o primeiro experimento oficial de uso do etanol em veículos (MACHADO, 2004; BRAUNBECK e CORTEZ, 2005).

A produção mundial de cana de açúcar totaliza aproximadamente 1,5 bilhões de toneladas por ano e está localizada predominantemente na faixa tropical do planeta, em países

da América Latina, África e do Sudeste Asiático. O Brasil, líder mundial na produção de cana de açúcar, na safra 2009/2010 produziu cerca de 598 milhões de toneladas. Desse total, cerca de 90% foi produzido na região Centro-Sul e 10% na região Nordeste (UNICA, 2011).

O processo produtivo da cana de açúcar visa três objetivos: alta produção de fitomassa por unidade de área, riqueza em açúcar dos colmos industrializáveis, e manutenção, ao longo do tempo, da produtividade e qualidade da matéria-prima obtida no sistema produtivo (CÂMARA, 1993).

3.2 Processo produtivo da cana de açúcar para fabricação de açúcar e etanol

A agroindústria da cana de açúcar envolve diversas etapas, como: produção e abastecimento da indústria com matéria-prima; gerenciamento dos insumos, resíduos, subprodutos e da versatilidade da produção de açúcar ou etanol; armazenamento e comercialização dos produtos finais. Estas etapas devem ser executadas com o emprego de técnicas eficientes de gerenciamento.

A Figura 1 apresenta o fluxograma básico do processo de fabricação de açúcar e álcool (etanol).

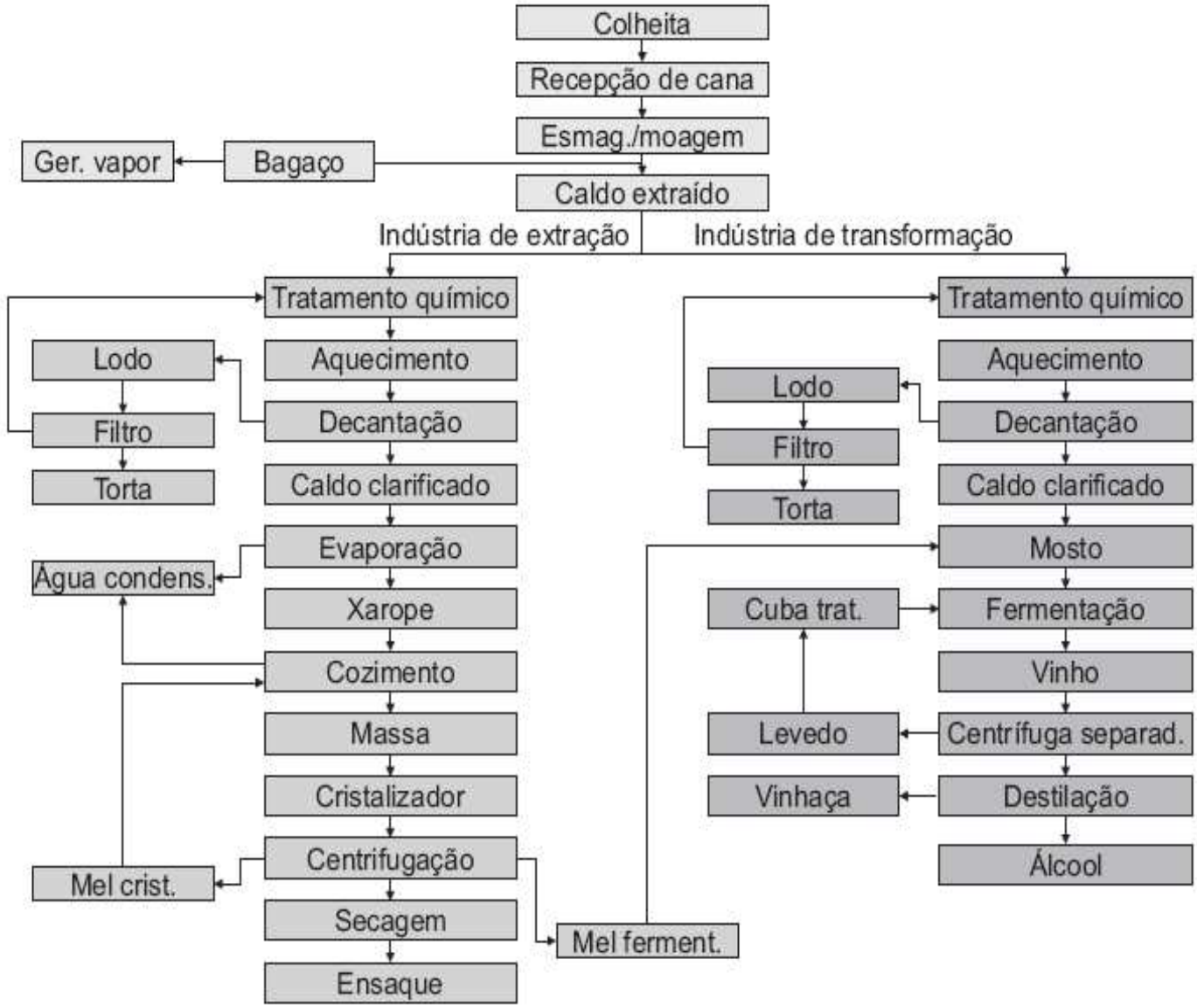

Figura 1 - Fluxograma básico de fabricação de açúcar e álcool (etanol)

Fonte: Adaptado de Elia Neto e Shintaku, 2009

3.2.1 Matéria-prima: composição e constituintes

No Brasil e em outras regiões tropicais do planeta o açúcar e o etanol etílico (etanol) são produzidos a partir da cana de açúcar. Entretanto, outras matérias-primas podem também serem utilizadas, como é o caso da beterraba, usada na Europa para a produção de açúcar, e o milho, utilizado para produção de etanol nos EUA. A principal vantagem na utilização da cana em relação a outras matérias-primas é a facilidade de conversão dos açúcares armazenados na

planta, extraídos através de seu caldo, em açúcar e etanol, o que resulta em grande competitividade econômica do processo produtivo.

A composição química da cana de açúcar é muito variável em função de condições como: clima, propriedades físico-químicas e microbiológicas do solo, tipo de cultivo, variedade cultivada, idade do canavial, estádio de desenvolvimento e estado sanitário, entre outros fatores. A composição média da cana de açúcar é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição média da cana de açúcar

Composição	Teor (%)
Água	65 – 74
Açúcares	11 – 18
Fibras	8 – 14
Sólidos Solúveis	12 – 23

Fonte: CTC, 2008

O valor nutricional da cana está diretamente ligado ao seu alto teor de açúcar (40% a 50% de açúcares na massa de matéria seca), uma vez que o seu conteúdo proteico é extremamente baixo.

A cana de açúcar é uma planta composta, em média, de 65% a 74% de água, mas seu principal componente é a sacarose, que corresponde de 70% a 91% de substâncias sólidas solúveis. O caldo conserva todos os nutrientes da cana de açúcar, entre eles minerais (de 3 a 5%) como ferro, cálcio, potássio, sódio, fósforo, magnésio e cloro, além de vitaminas do complexo B e C. A planta contém ainda glicose (de 2% a 4%), frutose (de 2% a 4%), proteínas (0,5% a 0,6%), amido (0,001% a 0,05%) ceras e graxos (0,05% a 0,015%) e corantes, entre 3% a 5%, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais constituintes da cana de açúcar

Constituintes	Sólidos solúveis (%)
Sacarose[1]	70 a 91
Glicose[1]	2 a 4
Frutose[1]	2 a 4
Sais[2] de ácidos inorgânicos	1,5 a 4,5
Sais[2] de ácidos orgânicos	1,0 a 3,0
Proteínas	0,5 a 0,6
Amido	0,001 a 0,05
Gomas	0,3 a 0,6
Ceras e Graxas	0,005 a 0,15
Corantes	3 a 5

[1] Açúcares: 75 a 93%. [2] Sais: 3 a 5%.

Fonte: CTC, 2008

3.2.2 Transporte, pesagem, descarregamento e estocagem

O sincronismo entre o setor agrícola e o industrial, no momento da retirada da cana do campo até a chegada à usina, é um dos fatores responsáveis pelo aumento do rendimento e redução do custo de produção. Por isso há necessidade de se utilizarem meios de transporte eficientes. Os tipos de subsistemas de transporte da matéria-prima até a indústria utilizados no Brasil são: rodoviário, ferroviário e hidroviário (PEREIRA e TORREZAN, 2006).

É através da malha rodoviária que circula cerca de 95% de toda cana de açúcar colhida no País. O transporte ferroviário e hidroviário também são utilizados pelo setor sucroalcooleiro, embora de maneira incipiente (SILVA, 2006).

A sincronização das etapas de transporte da cana de açúcar do campo até o descarregamento na usina é fundamental para o máximo rendimento e economia das máquinas envolvidas nesse processo. Um atraso no descarregamento pode gerar congestionamento de caminhões carregados com cana. Com isso, haverá falta de caminhões vazios no campo para a colheita e, consequentemente, as colhedoras serão obrigadas a parar suas atividades, o que diminuirá a eficiência do processo de transporte e recebimento da cana na usina.

Os veículos de transporte carregados com cana, inteira ou picada, são pesados antes e após o descarregamento obtendo-se, assim, o peso real da cana pela diferença entre as duas medidas. Algumas cargas são aleatoriamente selecionadas e amostradas, para posterior determinação, em laboratório, do teor de sacarose na matéria prima. É através da etapa de pesagem que se torna possível realizar o controle agrícola, o pagamento do transporte, o controle de moagem, o cálculo do rendimento industrial e, juntamente com a análise do teor de sacarose na cana, definir o preço para o pagamento da mesma (UNICA, 2008).

Após passar pela balança, os veículos carregados seguem para os pontos de descarga da usina, dependendo do tipo de caminhão, da cana (inteira ou picada), situação das filas e quantidade de cana a ser descarregada (RIPOLI e RIPOLI, 2005). Há diferentes maneiras de descarregar a cana nas mesas alimentadoras, o que depende, também, do tipo de veículo que a transporta. Os principais tipos de descarregamento ilustrados nas Figuras 2, 3 e 4 são:

(i) Descarregamento com rede: são montadas caixas de tela metálica sobre reboques com peso entre 25 e 40 toneladas. Uma rede metálica é fixada em uma das laterais e forra inteiramente o fundo da caixa. A cana é depositada sobre a rede. Sua extremidade fixa encosta ao lado da mesa alimentadora e um guindaste desengata a outra extremidade e a levanta, despejando, assim, a cana sobre a mesa alimentadora (Figura 2).

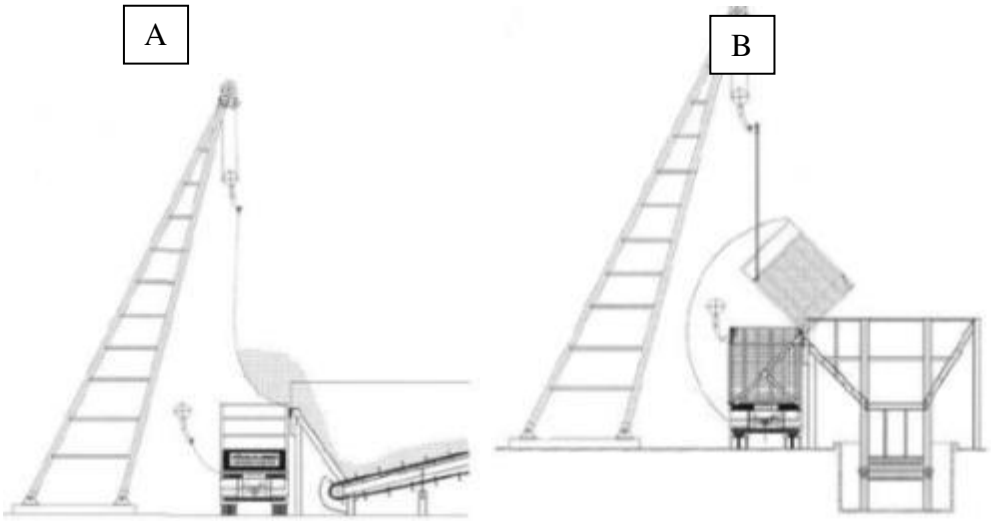

Figura 2 - Guindaste Hilo para cana inteira (A) e para cana picada (B)
Fonte: Ripoli e Ripoli, 2005

(ii) Descarregamento com garras: a garra é um equipamento com dentes e possui acionamento hidráulico, que descarrega a cana em mesas alimentadoras ou em pátios de estoque (Figura 3).

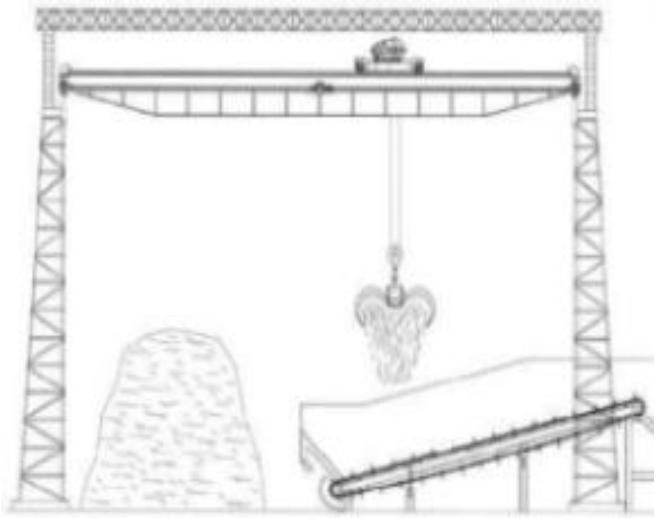

Figura 3 - Ponte rolante com garras para cana inteira
Fonte: Ripoli e Ripoli, 2005

(iii) Descarga lateral: alguns veículos possuem mecanismos para descarregar a cana lateralmente nas mesas ou no pátio (Figura 4).

Figura 4 - Descarga lateral em mesa rebaixada
Fonte: Ripoli e Ripoli, 2005

No caso da cana ter sido cortada manualmente, é prática comum enviar a maior quantidade para o processo de moagem e manter certa quantidade de cana em estoque em barracões cobertos ou em pátios abertos para compensar possíveis interrupções desta operação, como é o caso de paradas do processamento em horário noturno. Entretanto, a cana estocada deve ser renovada em curtos intervalos de tempo, sob o risco de redução de perdas de açúcar por decomposição bacteriológica. Por ser bastante susceptível à decomposição bacteriológica, a cana colhida mecanicamente é descarregada assim que chega à unidade produtora e enviada imediatamente para o processo de moagem (UNICA, 2008).

Das mesas alimentadoras a cana segue para a lavagem e, em seguida, é despejada nas esteiras metálicas de onde é encaminhada para a moagem.

3.2.3 A lavagem e o preparo da cana de açúcar

Depois de descarregada, a cana inteira é limpa com água para reduzir as impurezas que possam prejudicar o rendimento das etapas subsequentes. Esta é a primeira etapa, propriamente dita, do processo industrial.

A cana inteira, que possui em média 3 m de comprimento, é lavada com jatos d´água na própria mesa alimentadora. O efluente é despejado no fundo perfurado da mesa e encaminhado para peneiramento ("*cush-cush*") visando à remoção de materiais grosseiros (toletes de cana e palhas arrastadas durante a lavagem), que retornam à esteira de cana (ELIA NETO e SHINTAKU, 2009).

A cana picada em toletes de 20 a 25 cm possui mais áreas de atração de impurezas e não pode ser lavada, pois a perda de sacarose seria muito alta (cerca de 1 a 2 kg de sacarose por tonelada de cana picada).

Segundo Elia Neto e Shintaku (2009), o grau de sujidade da cana que chega à unidade produtiva varia de acordo com a época da colheita, do tipo de solo e procedimentos de colheita. O valor médio de impurezas minerais em percentagem de peso da cana é de 1%, e a faixa varia de 0,14 a 3,21%.

A prática do carregamento mecânico aumenta a quantidade de impurezas transportadas à usina, principalmente areia, argila, palha e pedras. A presença dessa matéria estranha, além de desgastes dos equipamentos por erosão, causa aumento do tempo de

decantação do caldo nos clarificadores, levando a um aumento da perda de açúcar por inversão da sacarose, destruição dos açúcares redutores e outras reações indesejáveis.

As águas residuárias geradas nessa operação apresentam alto potencial poluidor, obrigando as unidades a instalarem sistemas de tratamento desse efluente, antes do descarte na lavoura ou corpo receptor (PIACENTE, 2005).

Ressalta-se que a eficiência da lavagem da cana de açúcar depende não só do volume de água, mas também da qualidade da aplicação, das condições de solo e clima durante o carregamento e do tipo de mesa instalada. As mesas convencionais possuem grande capacidade de alimentação, porém, trabalham com uma camada de cana muito alta, o que dificulta a alimentação e diminui a eficiência da lavagem. Já as mesas de 45° trabalham numa velocidade maior, com uma camada de cana bem baixa, facilitando a alimentação mais regular com aumento na eficiência da lavagem.

O objetivo básico do preparo da cana é aumentar a sua densidade e, consequentemente, a capacidade de moagem, bem como realizar o máximo rompimento das células para liberação do caldo nelas contido obtendo-se, portanto, uma maior extração.

Basicamente, o sistema de preparo é constituído por um ou dois jogos de facas - um nivelador e outro picador - que têm a finalidade de nivelar o colchão de cana proveniente da mesa alimentadora e reduzir o tamanho da matéria-prima, encaminhando-a para o tambor alimentador. Este, por sua vez, encaminha a matéria-prima para o desfibrador - equipamento constituído por dois cilindros dispostos horizontalmente, possuindo uma superfície construída de maneira que rasgue e desfibre a cana desintegrando-a para que a moenda possa trabalhá-la com eficiência e rapidez (OLIVÉRIO et al., 2010a). O desfibrador é instalado sozinho após o conjunto de picadores e antes do separador magnético, que tem a finalidade de atrair e reter os pedaços de ferro que passam pelo seu campo de ação.

Os principais componentes do processo de moagem são apresentados na Figura 5.

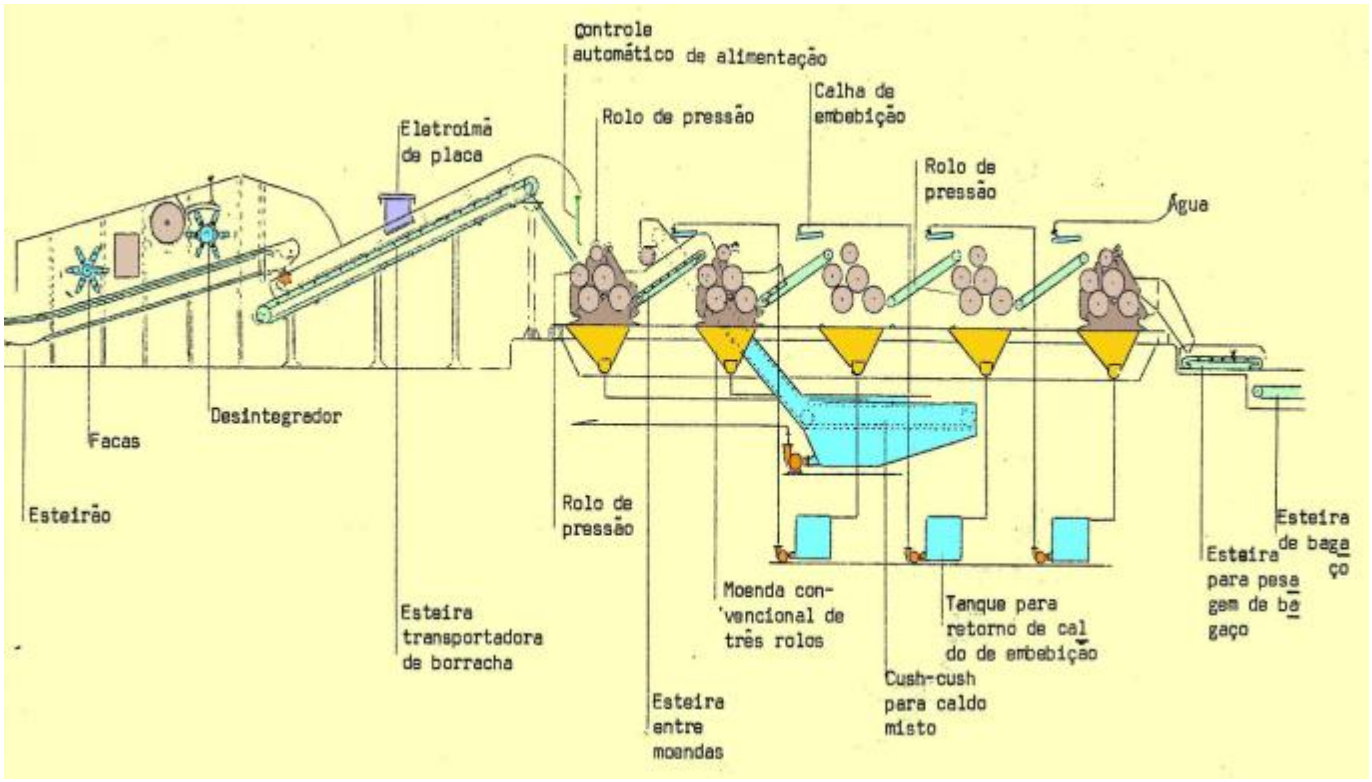

Figura 5 - Visão de um conjunto de moagem (5 ternos)

Fonte: Adaptado de Elia Neto e Shintaku, 2009a

3.2.4 Limpeza a seco

Uma tonelada de cana de açúcar possui, em média, 150 quilos de sacarose (2% deste volume podem ser perdidos no procedimento de lavagem da cana). Com o aumento da mecanização das lavouras há uma forte tendência de redução, ou mesmo eliminação, do sistema de limpeza da cana com água, baseado no conceito do sistema de limpeza (ou lavagem) a seco (UNICA, 2008).

O sistema em questão data de 2007 e foi preconizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC). Há inúmeras vantagens deste novo método de limpeza, sendo uma das principais a separação das impurezas vegetais (palha) e minerais (terra) da cana colhida sem que ocorra o arraste da sacarose pela água, podendo ser aplicado tanto para o processamento da cana inteira como da cana picada.

Segundo o CTC (2007), este novo processo de remoção das impurezas minerais registra eficiência de 70%, considerado excelente no comparativo aos métodos tradicionais.

Quanto aos resíduos vegetais, estes podem ser reaproveitados como combustível-base para a geração de energia elétrica, complementar ao bagaço, para as caldeiras.

Por excluir a necessidade de processamento do palhiço, a tecnologia permite que a usina diminua o tempo de moagem e ajuste a safra para um período maior de maturação de cana. Outro benefício importante do novo sistema é a diminuição no desgaste dos equipamentos. Em termos ambientais, a limpeza de cana a seco possibilita o desenvolvimento de um combustível ambientalmente correto e sua utilização na geração de energia elétrica renovável (CTC, 2007).

O sistema em questão pode ser utilizado visando o aumento da capacidade de geração de energia elétrica excedente pelas usinas, atendendo a crescente demanda e perspectivas de racionamento futuro de energia elétrica no país. Além disso, a proximidade das usinas dos centros consumidores de energia elétrica reduz investimentos e custos de distribuição, bem como perdas na energia produzida.

Considerando-se a forte tendência de aumento da cana picada em detrimento da cana inteira, devido ao processo de mecanização da colheita, a adoção do sistema de limpeza a seco se apresenta como solução de ponta para agregar qualidade à cana de açúcar.

Há de se ressaltar que neste novo método ainda há a necessidade de captação de água, sendo esta captada no início da safra e quase sempre recirculada, operando em circuito fechado. Neste sistema, a água é necessária, predominantemente, para o escoamento de resíduos (RIBEIRO, 2011).

A Figura 6 apresenta detalhes do sistema de limpeza a seco da cana de açúcar.

Figura 6 - Detalhes do sistema de limpeza a seco da cana de açúcar (A, B e C: vista geral; D: mesa de 45° para recepção da cana de açúcar)

Fonte: Fotos do Autor - Usina Cerradinho, 2008

3.2.5 Extração e tratamento primário do caldo

A extração consiste no processo físico de separação da fração líquida do colmo, contendo açúcares (caldo) da fração fibra da cana, com o máximo de eficiência possível. Na extração por moagem, a separação é feita por pressão mecânica dos rolos da moenda sobre o colchão de cana desfibrada. Na difusão, a separação é feita pela lavagem da sacarose absorvida ao colchão de cana.

No processo de moagem, a cana de açúcar previamente picada e desfibrada chega às moendas por meio de um alimentador vertical, o *Chutt – Donelly* (alimentação forçada). Cada conjunto de rolos de moenda, montados numa estrutura denominada castelo, constitui um terno de moenda. O número de ternos utilizados neste processo varia de quatro a seis, e cada um deles é formado por três cilindros principais dispostos de tal modo que a unidade de seus

centros forma um triângulo isósceles. Destes três cilindros, dois se encontram situados à mesma altura, girando na mesma direção, recebendo o nome de anterior (por onde entra a cana), e posterior (por onde ela sai), o terceiro cilindro, chamado superior, está colocado entre os dois, em plano superior, girando em sentido contrário. Normalmente, as moendas contam com um quarto rolo, denominado rolo de pressão, que melhora a eficiência de alimentação.

A cana desfibrada chega à primeira moenda, onde recebe a primeira compressão entre o cilindro anterior e superior e uma segunda compressão entre o cilindro posterior e o superior. Tem-se, pois, um caldo conhecido como primário. O bagaço resultante segue pela esteira intermediária para o segundo terno de moagem, recebendo novamente duas pressões. Os esmagamentos se sucedem para os ternos seguintes. O bagaço final sai com umidade em torno de 50% e segue para as caldeiras, onde se produz vapor que será consumido em todo o processamento e no acionamento das próprias moendas. O bagaço sofrerá tantas compressões quantas forem as unidades esmagadoras.

Durante a passagem do bagaço de uma moenda para outra, realiza-se a embebição, ou seja, a adição de água ou caldo diluído, com a finalidade de se aumentar a extração de sacarose.

A eficiência de um terno de moenda pode ser medida por dois parâmetros: capacidade e eficiência de extração. Entende-se por capacidade de um terno de moagem a quantidade de cana moída por unidade de tempo. Já o termo eficiência de extração refere-se à quantidade de sacarose extraída da cana pelas moendas. Dentre os fatores que afetam a capacidade de moagem, destacam-se: preparo da cana; eficiência de alimentação da moenda; tamanho e tipo dos cilindros da moenda e regulagem da bagaceira.

A extração do caldo por difusão consiste na condução da cana em aparelhos conhecidos como difusores, a fim de que a sacarose adsorvida ao material fibroso seja diluída e removida por lixiviação ou lavagem num processo de contra-corrente. Visando reduzir a quantidade de água necessária, é feita uma operação de retorno do caldo diluído extraído. Assim, ao final da operação, quando o bagaço se apresenta exaurido ao máximo, faz-se a lavagem com água fresca. O líquido obtido dessa lavagem, contendo alguma sacarose que se conseguiu extrair do bagaço, é usado na lavagem anterior por ser um pouco mais rico e, assim sucessivamente. Esse retorno pode ser efetuado de cinco a vinte vezes, dependendo do grau de esgotamento desejado.

Com a utilização de difusores obtém-se eficiência de extração da ordem de 98%, contra os 96% conseguidos com a extração por moendas. Os tipos de difusores utilizados são: difusores oblíquos (DDS); difusores horizontais (utilizados no Brasil) e difusores circulares.

Dentre as vantagens no uso dos difusores, destacam-se: baixo custo de manutenção; baixo consumo de energia; obtenção de caldos mais puros; alta extração de sacarose e; menor desgaste. Já a desvantagem do uso de difusores é que estes carregam mais impurezas com o bagaço para as caldeiras, exigindo maior limpeza das mesmas devido à pior qualidade do bagaço.

O caldo de cana obtido no processo de extração apresenta uma quantidade e qualidade variável de impurezas, que podem ser solúveis ou insolúveis. O tratamento primário objetiva a máxima eliminação das impurezas insolúveis (areia, argila, bagacilho, etc.), cujos teores variam de 0,1% a 1% (OLIVÉRIO et al., 2010a). A eliminação deste material beneficia o processo e aumenta a eficiência e a vida útil dos equipamentos instalados, contribuindo também para a obtenção de produtos finais de melhor qualidade. O equipamento básico utilizado neste tratamento é formado pelo *cush-cush,* peneiras e hidrociclones.

O *cush-cush*, ou separador de bagacilhos, é constituído por peneiras fixas com aberturas de 0,5 mm a 2 mm, localizado bem próximo da moenda, cujo objetivo é eliminar o material mais grosseiro em suspensão (bagacilho).

Atualmente, o peneiramento do caldo é realizado por diferentes tipos de peneiras (DSM, rotativa, vibratória), que utilizam telas de vários modelos e aberturas (0,2mm a 0,7mm), com uma eficiência da ordem de 60% a 80%. Também retorna à moenda o material retido.

Em relação aos hidrociclones, o princípio de funcionamento deste equipamento baseia-se na diferença de densidades sólido/líquido: ao ser aplicada, a força centrífuga separa a areia e a argila do caldo.

Após o tratamento primário, a massa de caldo a ser enviada ao processo é quantificada através de medidores de vazão ou balanças de caldo, permitindo um melhor controle químico do processo.

3.2.6 Produção de açúcar

O tratamento do caldo para a fabricação de açúcar pode ser dividido nas seguintes fases: sulfitação, calagem, aquecimento, sedimentação, filtração e evaporação.

a) Sulfitação do caldo

Consiste na absorção de anidrido sulfuroso (SO_2) pelo caldo, baixando o seu pH original a 4,0 - 4,5. O caldo misto resultante da moagem tem um aspecto verde escuro e viscoso; é rico em água, açúcar e impurezas, tais como: bagacilhos, areias, colóides, gomas, proteínas, clorofila e outras substâncias corantes. A sulfitação tem como objetivos principais a inibição de reações que causam a formação de cor; a coagulação de colóides solúveis; a formação de sulfito de cálcio ($CaSO_3$); a diminuição da viscosidade do caldo e, consequentemente, do xarope, massas cozidas e méis, facilitando as operações de evaporação e cozimento.

b) Calagem

Trata-se do processo de adição do leite de cal [$Ca(OH)_2$] ao caldo, elevando o seu pH a valores da ordem de 6,8 a 7,2. A calagem é realizada em tanques ou em linha, num processo contínuo, objetivando o controle do pH final. Esta neutralização tem por objetivo a eliminação de corantes do caldo, a neutralização de ácidos orgânicos e a formação de sulfito e fosfato de cálcio - produtos estes que, ao sedimentarem, arrastam consigo impurezas presentes no líquido.

c) Aquecimento

O caldo sulfitado e caleado segue para os aquecedores, onde atinge temperatura média de 105ºC. A finalidade do processo é acelerar e facilitar a coagulação e floculação de colóides e não açúcares proteicos, emulsificar graxas e ceras, ou seja, acelerar o processo químico, aumentando a eficiência da decantação, além de possibilitar a degasagem (remoção do ar) do caldo.

d) Sedimentação

É a etapa de purificação do caldo, pela remoção das impurezas floculadas nos tratamentos anteriores. Este processo é realizado de forma contínua em um equipamento denominado clarificador ou decantador, que possui vários compartimentos (bandejas), com a finalidade de aumentar a superfície de decantação.

O caldo decantado é retirado da parte superior de cada compartimento e enviado ao setor de evaporação para concentração. As impurezas sedimentadas, com uma concentração de sólidos de aproximadamente 10ºBe constituem o lodo que, normalmente, é retirado do decantador pelo fundo e enviado ao setor de filtração para recuperação do açúcar nele contido.

O tempo de residência do caldo no decantador, dependendo do tipo de equipamento empregado, varia de 15 minutos a 4 horas, e a quantidade de lodo retirada representa de 15% a 20% do peso do caldo que entra no decantador.

e) Filtração

Antes de ser enviado aos filtros rotativos, o lodo retirado do decantador recebe a adição de, aproximadamente, 3 kg a 5 kg de bagacilho por tonelada de cana, que irão agir como auxiliar de filtração. Esta filtração objetiva recuperar o açúcar contido no lodo, fazendo com que este retorne ao processo na forma de caldo filtrado. O material retido no filtro recebe o nome de torta e é enviado à lavoura para ser utilizado como adubo. É importantíssimo controlar a perda de açúcar na torta, pois seu valor não deveria ser superior a 1%.

f) Evaporação

O caldo clarificado obtido nos decantadores é submetido a um processo de concentração através da eliminação da água presente. A primeira etapa da concentração é realizada no equipamento chamado evaporador, que opera de forma contínua. O evaporador é formado por caixas, normalmente em número de quatro ou cinco, ligadas em série, de maneira que o caldo sofra uma concentração progressiva da primeira à última. Para isto, é necessário injetar vapor somente na primeira caixa, pois a própria água evaporada irá aquecer o caldo nas caixas seguintes. Este procedimento, obtido devido à diferença de pressão existente entre os corpos, é mantido por um sistema gerador de vácuo ligado à última caixa. O caldo apresenta, inicialmente, uma concentração de 14 - 16º Brix chegando, no final, a 55º - 65º Brix, quando recebe a denominação de xarope.

Após deixar os evaporadores, o xarope é enviado para outra etapa de concentração, quando ocorrerá a formação dos cristais de açúcar (OLIVÉRIO et al., 2010a), em virtude da precipitação da sacarose dissolvida na água. Há dois tipos de cristalização: em movimento, ou cozimento, e cristalização por resfriamento.

No primeiro tipo são utilizados equipamentos denominados cozedores ou tachos, semelhantes às caixas dos evaporadores, que trabalham individualmente sob vácuo e de forma

descontínua. A evaporação da água dá origem a uma mistura de cristais envolvidos em mel (solução açucarada) que recebe o nome de massa cozida. A concentração desta massa cozida é de aproximadamente 93º - 95º Brix e sua temperatura, ao ser descarregada, é de 65º - 75°C. Dependendo das conveniências pode-se trabalhar com os sistemas de uma, duas ou três massas cozidas.

Na cristalização por resfriamento a massa cozida é descarregada dos cozedores nos chamados cristalizadores (tanques em forma de U dotados de agitadores) onde irá ocorrer o resfriamento lento, geralmente com auxílio de água ou ar. Esta operação visa recuperar parte da sacarose que ainda se achava dissolvida no mel, pois, pelo resfriamento, haverá deposição da sacarose nos cristais existentes, aumentando o tamanho dos mesmos.

Dos cristalizadores, a massa cozida resfriada segue para o setor de centrifugação e é descarregada nas centrífugas. Estas são constituídas por um cesto perfurado, fixado a um eixo e acionado por um motor que o gira em alta velocidade.

A ação da força centrífuga faz com que o mel atravesse as perfurações da tela do cesto, ficando retidos, em seu interior, somente os cristais de sacarose. O processo se completa pela lavagem do açúcar com água e vapor, ainda no interior do cesto.

O mel removido é coletado em um tanque e retorna aos cozedores para recuperação do açúcar dissolvido ainda presente, até que se atinja um maior esgotamento do mesmo. A partir deste ponto, o mel passa a ser denominado mel final ou melaço e é enviado para a fabricação de etanol. O açúcar descarregado das centrífugas apresenta temperatura elevada (65-95°C), devido à lavagem com vapor.

O resfriamento e a secagem do açúcar são realizados em um secador - um tambor metálico através do qual passa, em contracorrente, um fluxo de ar succionado por um exaustor. Ao deixar o secador, com uma temperatura entre 35º e 40°C e umidades na faixa de 0,03% a 0,04%, o açúcar está pronto para ser enviado ao ensaque. O ar que passa pelo secador arrasta consigo uma pequena quantidade de pó de açúcar sendo, portanto, necessária a lavagem deste ar para recuperação do açúcar arrastado, retornando-o posteriormente ao processo.

Do secador, o açúcar é recolhido a uma moega com fundo afunilado, que o despeja de forma descontínua diretamente no saco localizado em cima de uma balança, realizando, portanto, a operação de ensaque e pesagem.

Máquinas de costura industriais realizam o fechamento do saco, que está pronto para a armazenagem. O açúcar é armazenado em sacos de 50 kg e em locais previamente determinados, facilitando o controle de qualidade.

A Figura 7 apresenta um fluxograma ilustrando as etapas de fabricação do açúcar.

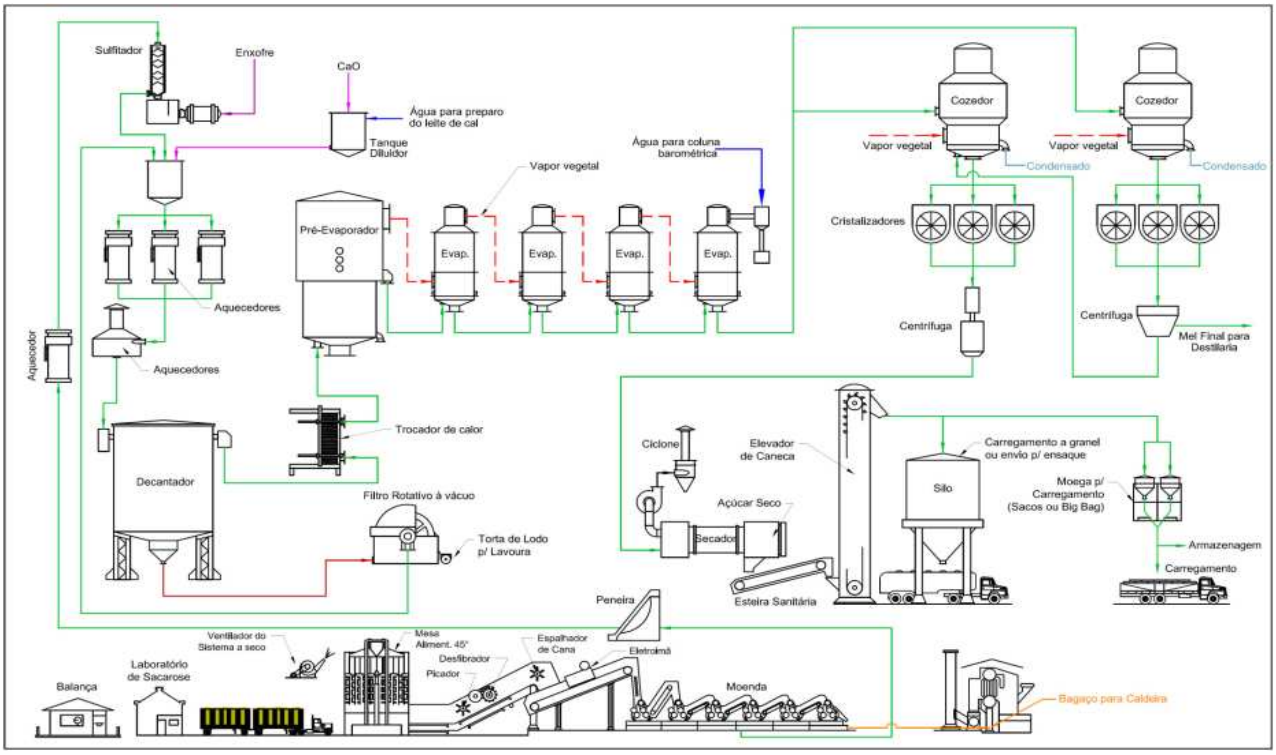

Figura 7 - Fluxograma das etapas de fabricação do açúcar

Fonte: Adaptado de Elia Neto e Shintaku, 2009a

3.2.7 Produção de etanol

Após passar pelo tratamento primário, o caldo passa por um tratamento similar à fabricação do açúcar, porém, menos intenso. Tanto a esse caldo como também ao mel residual ou xarope, gerados na fabricação de açúcar, são adicionadas leveduras. A mistura, conhecida como mosto, é armazenada nas dornas, para fins de fermentação, cujo processo enzimático produz gás carbônico, calor e o vinho.

Este caldo deverá sofrer pasteurização com aquecimento e resfriamento imediato, para remoção de impurezas e contaminações (OLIVÉRIO et al., 2010a). Um tratamento mais completo do caldo implica na adição de cal, aquecimento e posterior decantação, tratamento

semelhante àquele já descrito na fabricação de açúcar (exceção feita à etapa de sulfitação, que não é obrigatória na fabricação de etanol).

Em geral, o resfriamento do caldo é realizado em duas etapas: fazendo-se passar o caldo quente por um trocador de calor em contracorrente com o caldo misto frio, onde o caldo misto é aquecido e o caldo para destilaria é resfriado (T ≅ 60°C) e; com o resfriamento final até aproximadamente 30°C, normalmente realizado em trocadores de placas utilizando água em contracorrente, como fluido de resfriamento. Livre de impurezas (areia e bagacilho, principalmente) e devidamente esterilizado, o caldo está pronto para ser encaminhado para fermentação.

Na fermentação, os açúcares são transformados em etanol em tanques denominados dornas de fermentação, ou fermentadores, onde se misturam o mosto (solução de açúcar cuja concentração foi ajustada de forma a facilitar a sua fermentação) e leveduras, na proporção de 2:1, respectivamente. O processo de fermentação mais comumente utilizado nas destilarias do Brasil é o de *Melle-Boinot*, cuja característica principal é a recuperação da levedura através da centrifugação do vinho.

O período de permanência do caldo nas dornas se estende de 8 a 10 horas. Da fermentação do caldo resulta um líquido chamado vinho. O vinho é, então, submetido à centrifugação visando a recuperação do creme de levedura, que é encaminhado ao 'pé-de-cuba' (pequena dorna) donde, após tratamento adequado (até pH=3), retorna às dornas de fermentação, dando sequência ao processo.

A destilação é a operação de separação dos diferentes constituintes do vinho, com o objetivo de recuperar o etanol presente na solução. Este processo ocorre basicamente devido aos diferentes pontos de ebulição de diversas substâncias voláteis presentes.

Para a produção de etanol hidratado, colunas são usadas para obter a concentração de 92,6 ° a 93,8°GL v/v. Da primeira coluna, a vinhaça é obtida e normalmente usada como fertilizante nas lavouras de cana. Já para a produção de etanol anidro, duas colunas adicionais são usadas para obter a concentração de 99,3° GL v/v (mínimo) (OLIVÉRIO et al., 2010a). Para obtenção deste etanol, o processo de desidratação do etanol hidratado é feito com emprego de arrastadores (ciclo hexano) em peneira molecular. Desta operação resulta como subproduto o óleo fúsel.

Os etanóis produzidos, hidratado e anidro, são quantificados através de medidores de vazão ou tanques calibrados e enviados para armazenagem em tanques de grande volume, situados em parques de tanques, onde aguardam sua comercialização e posterior remoção por caminhões.

A Figura 8 apresenta um fluxograma com as etapas de fabricação do etanol.

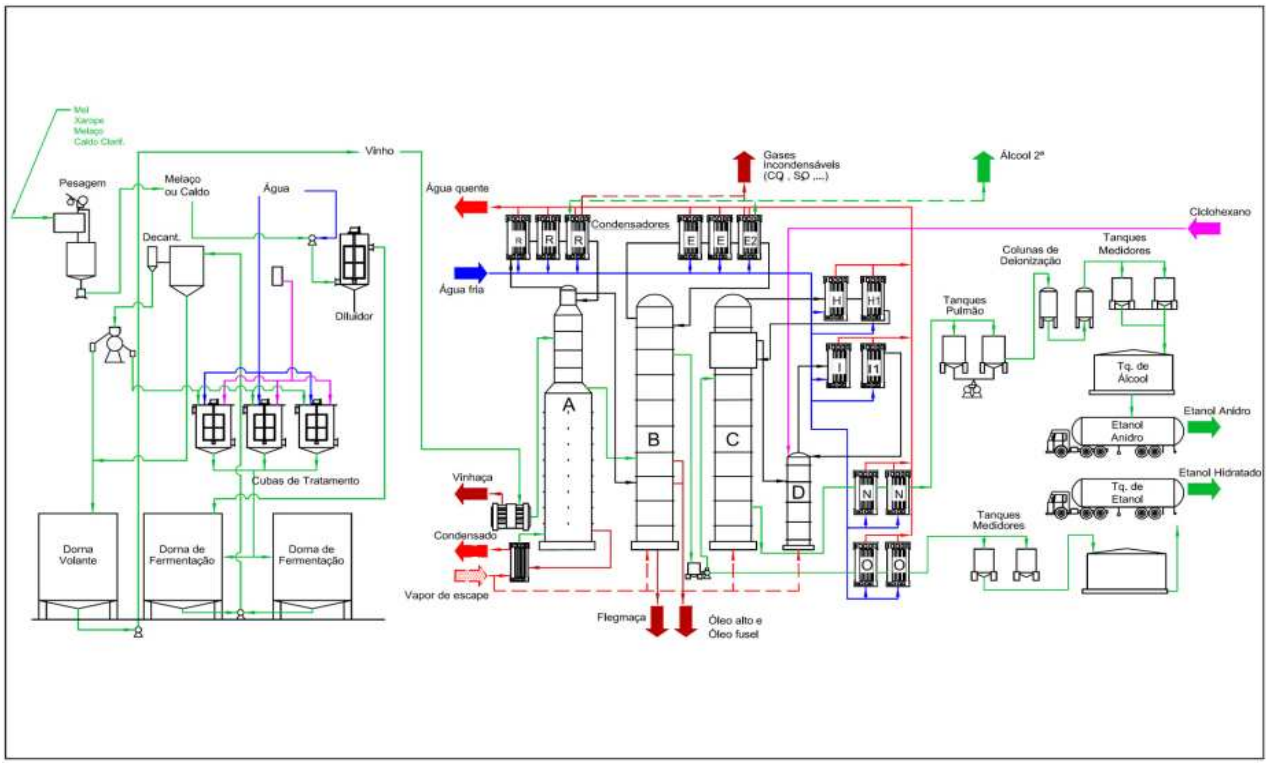

Figura 8 - Fluxograma das etapas de fabricação do etanol

Fonte: Adaptado de Elia Neto e Shintaku, 2009a

3.2.8 Geração de energia

A cana de açúcar é um recurso totalmente renovável capaz de gerar açúcar, etanol anidro e hidratado, além de possibilitar a geração de energia elétrica por meio da queima do bagaço e a produção de plástico biodegradável, a partir do açúcar.

Segundo definição da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a cogeração de energia é o processo de produção combinada de calor útil e energia mecânica, geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia química disponibilizada por um ou mais combustíveis. A cogeração trata-se da associação da geração

simultânea combinada de dois ou mais tipos de energia, utilizando um único tipo de fonte energética. No presente caso, a fonte energética é o bagaço de cana que, ao ser queimado, gera energia térmica em forma de vapor e energia elétrica. O funcionamento ocorre da seguinte maneira: em uma fornalha o bagaço é queimado, enquanto o vapor é produzido em uma caldeira. O jato de vapor gira uma turbina que, por estar interligada ao eixo de um gerador, faz com que este entre em movimento, gerando a energia elétrica.

O mercado brasileiro de energia elétrica vem atravessando grandes turbulências, devido à demanda e à inflexibilização da oferta. Um levantamento do consumo de energia elétrica per capita mostrava o Brasil na 82ª colocação, no início do milênio, ficando atrás de pequenos países como Guiana Francesa, Uruguai e Venezuela (ORTEGA FILHO, 2003). Este mesmo autor, diante deste mercado, indica que uma possível solução para os problemas que o Brasil enfrenta em relação à produção de energia é a geração de eletricidade, a partir do uso de resíduos da cana de açúcar (bagaço, palha, palhiço, etc.), alternativa que apresenta diversos aspectos positivos, como: atendimento da necessidade nacional de geração de energia elétrica a partir de novas fontes energéticas; produção de energia elétrica com tecnologia totalmente limpa, de fonte renovável, que contribui para a preservação ambiental; produção de energia elétrica, sobretudo na época de menor pluviosidade, que coincide com a safra sucroalcooleira; inclusão de um novo agente de produção de energia elétrica, contribuindo, assim, para a consolidação do novo modelo de mercado competitivo; ganho de competitividade no setor sucroalcooleiro mundial, uma vez que será agregado novo produto de receita estável a partir do melhor aproveitamento de um produto residual e; utilização de tecnologia totalmente nacional, preservando empregos locais e desonerando a balança de pagamentos do País.

Outra vantagem da utilização do bagaço para geração de energia é o baixo custo, já que o produto não depende de variações cambiais. Para as usinas, além de fonte adicional de receita, a cogeração pode representar a oportunidade de renovação da planta industrial, com investimentos em novas máquinas e equipamentos mais modernos e eficientes.

Entretanto, o sistema apresenta diversas dificuldades, como a demora em se conseguir financiamentos para os investimentos, incertezas quanto à real capacidade de absorção pelo mercado da energia gerada pelo setor canavieiro e quanto à suficiência do lucro para cobrir os custos operacionais e permitir a amortização dos investimentos.

A possibilidade de o setor sucroalcooleiro aumentar a geração de energia elétrica está ligada a questões como: tipo de tecnologia e potência a serem instaladas; período de geração (na safra de cana ou o ano todo); a quem e de que forma vender o excedente de energia; fontes e condições para se viabilizar os novos investimentos; importância da nova atividade em relação às tradicionais açúcar e etanol; mudanças a serem feitas na lavoura canavieira, especialmente o aproveitamento da palha como fonte geradora de energia.

3.3 Aspectos ambientais da agroindústria canavieira

Qualquer que seja a atividade agrícola, na medida em que emprega recursos naturais, como água e solo, usa insumos e defensivos químicos, como fertilizantes e pesticidas, apresenta algum impacto ambiental. Contudo, a partir de planejamento e ocupação criteriosa do solo agrícola, emprego de técnicas de conservação para cada cultura e região, pode-se reduzir muito os possíveis impactos ambientais negativos gerados, garantindo a proteção aos recursos ambientais, de maneira a perdurar seus serviços e permitindo, assim, que as gerações futuras desfrutem de sua qualidade (STRAPASSON e JOB, 2006).

Os impactos ambientais negativos somente poderão continuar a ocorrer se houver adoção de medidas mitigadoras, para efetivamente eliminá-los ou minimizá-los, quando a eliminação não for possível. Essas medidas deverão ser planejadas e adotadas em sistemas de monitoramento, avaliando os riscos ambientais que apresentam. Relata também, que o desenvolvimento de atividades econômicas provoca modificações, e que toda economia precisa evoluir. Da mesma forma, está sendo considerado que o ambiente tem uma capacidade limitada de suportar alterações. Sendo assim, faz-se necessário avaliar, com rigor, as questões que este tema envolve. Os itens de maior importância relativos a essa pesquisa são: uso de resíduos da agroindústria canavieira, o uso da água e o licenciamento ambiental (JENDIROBA, 2006).

3.4 Resíduos

O setor sucroalcooleiro é conhecido por gerar grande quantidade de resíduos, por sua dimensão. O setor desenvolveu-se dimensionando a retirada dos resíduos da unidade industrial em velocidade praticamente proporcional à sua geração, pois seria impraticável o armazenamento de todos os resíduos nos períodos de produção (JENDIROBA, 2006).

Um fluxograma ilustrando a produção de açúcar, etanol, bioeletricidade e resíduos é apresentado na Figura 10.

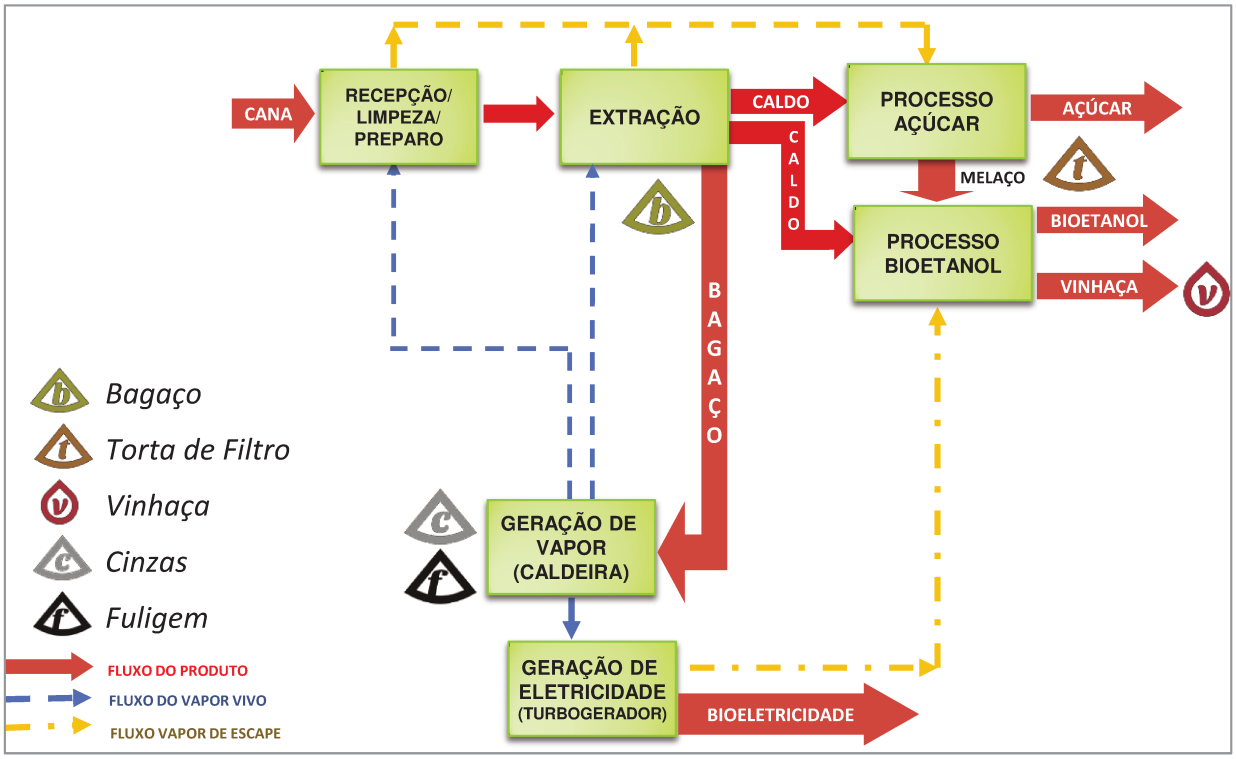

Figura 9 - Fluxograma da produção de Açúcar, Etanol, Bioeletricidade e Resíduos.

Fonte: Próprio Autor

Os tópicos seguintes abrangem os principais resíduos do setor em questão, abordando sua utilização e importância no contexto ambiental.

3.4.1 Vinhaça

Todos os líquidos susceptíveis a sofrer uma fermentação são denominados mostos. Uma vez fermentado, o mosto de cana passa a chamar-se vinho e pode ser destilado possibilitando a recuperação de etanol, restando um resíduo que é a vinhaça.

A vinhaça é um resíduo ácido (pH 4,0 a 4,8), de cor escura, com alta demanda bioquímica de oxigênio - DBO médio de 19.800 mg L^{-1} (caldo + mel) (GLÓRIA e ORLANDO FILHO, 1984), e emite um cheiro forte característico. Aproximadamente de 10 a 18 litros de vinhaça são obtidos por 1 litro de etanol produzido e sua composição varia de

acordo com a matéria prima e equipamentos utilizados no processo de obtenção do etanol (WADT, 2008).

Dos efluentes produzidos pelas destilarias de etanol, a vinhaça é a que possui a maior carga poluidora. A vinhaça constitui um dos grandes problemas ambientais, quando lançada nos meios hídricos, em função da alta DBO, possuindo ação redutora extremamente alta e requerendo elevada taxa de oxigênio para estabilizar-se. Resiste tenazmente aos métodos usuais de tratamentos de resíduos, é muito volumosa, apresenta características ácidas e corrosivas, o que dificulta o seu armazenamento e transporte sem prévio tratamento (SZMRECSÁNYI et al., 2008).

A Tabela 3 apresenta a caracterização físico-química da vinhaça (média de 64 amostras de 28 usinas do Estado de São Paulo).

Tabela 3 - Caracterização físico-química da vinhaça

Descrição	Unidade	Concentrações			
Dados do Processo		Mínimo	Médio	Máximo	Padrão/L etanol
Brix do mosto	(°Brix)	12	18,65	23,65	
Teor alcoólico do vinho	(°GL)	5,73	8,58	11,3	
Taxa de vinhaça	(L L^{-1} etanol)	5,11	10,85	16,43	
Vazão de referência	(m^3 dia^{-1})	530	1908,86	4128	
pH	-	3,5	4,15	4,9	
Temperatura	ºC	65	89,16	110,5	
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5)	mg.L^{-1}	6680	16949,76	75330	175,13g
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg.L^{-1}	9200	28450	97400	297,6g
Sólidos Totais (ST)	mg.L^{-1}	10780	25154,61	38680	268,9g
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg.L^{-1}	260	3966,84	9500	45,71g
Sólidos Suspensos Fixos (SSF)	mg.L^{-1}	40	294,38	1500	2,69g
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)	mg.L^{-1}	40	3632,16	9070	43,02g
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	mg.L^{-1}	1509	18420,06	33680	223,19g
Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV)	mg.L^{-1}	588	6579,58	15000	77,98g
Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF)	mg.L^{-1}	921	11872,36	24020	145,21g
Resíduos Sedimentáveis (RS) 1 hora	ml.L^{-1}	0,2	2,29	20	24,81ml
Cálcio	mg.L^{-1} CaO	71	515,25	1096	5,38g
Cloreto	mg.L^{-1} Cl	480	1218,91	2300	12,91g
Cobre	mg.L^{-1} CuO	0,5	1,2	3	0,01g
Ferro	mg.L^{-1} Fe_2O_3	2	25,17	200	0,27g
Fósforo total	mg.L^{-1} P_2O_4	18	60,41	188	0,65g

Magnésio	$mg.L^{-1}$ MgO	97	225,64	456	2,39g
Manganês	$mg.L^{-1}$ MnO	1	4,82	12	0,05g
Nitrogênio	$mg.L^{-1}$ N	90	356,63	885	3,84g
Nitrogênio amoniacal	$mg.L^{-1}$ N	1	10,94	65	0,12g
Potássio total	$mg.L^{-1}$ K_2O	814	2034,89	3852	21,21g
Sódio	$mg.L^{-1}$ Na	8	51,55	220	0,56g
Sulfato	$mg.L^{-1}$ SO_4	790	1537,66	2800	16,17g
Sulfito	$mg.L^{-1}$ SO_4	5	35,9	153	0,37g
Zinco	$mg.L^{-1}$ ZnO	0,7	1,7	4,6	0,02g
Etanol-CG	$ml.L^{-1}$	0,1	0,88	119	9,1ml
Glicerol	$ml.L^{-1}$	2,6	5,89	25	62,1ml
Levedura (base seca)	$mg.L^{-1}$	114,01	403,56	1500,15	44,1g

Fonte**:** Elia Neto e Nakahodo, 1995

A vinhaça é empregada no setor agrícola como fertilizante principalmente nos cultivos de cana de açúcar. Este resíduo pode promover melhoria na fertilidade do solo, no entanto, as quantidades não devem ultrapassar sua capacidade de retenção de íons, ou seja, as dosagens dependem das características do solo. Quando usada em proporções desbalanceadas acarreta na lixiviação de vários desses íons, sobretudo nitrato e potássio (K) (SILVA, 2007), podendo, também, acarretar em problemas de produtividade, mostrando um efeito negativo deste resíduo sobre a maturação da cana de açúcar (GOMES, 2003). A quantidade a ser utilizada deve considerar a profundidade e a fertilidade do solo, a concentração de K na vinhaça e a extração média desse elemento pela cultura, conforme fórmula constante no item 6 da Norma Técnica CETESB-P4.231.

Os seguintes efeitos benéficos da aplicação da vinhaça no solo podem ser enumerados: (i) elevação do pH; (ii) aumento da disponibilidade de alguns íons; (iii) aumento da capacidade de troca catiônica (CTC); (iv) aumento da capacidade de retenção de água e; (v) melhoria da estrutura física do solo (GLÓRIA e ORLANDO FILHO, 1983).

A vinhaça deve ser vista, também, como agente do aumento da população e atividade microbiana no solo. O pH dos solos tratados com vinhaça aumenta principalmente em áreas cultivadas há mais tempo (SILVA e RIBEIRO, 1998), embora nos primeiros dez dias após sua aplicação, o pH sofra uma redução considerável para, posteriormente, elevar-se abruptamente, podendo alcançar valores superiores a sete; este efeito está ligado à ação dos microrganismos (ROSSETTO, 1987).

A grande preocupação da vinhaça advém de sua decomposição química e da quantidade na qual é gerada, na qual a torna um grande poluidor. É caracterizada por ser um resíduo com um alto conteúdo de matéria orgânica, elementos minerais, e cor marrom-escura devido a presença de polímeros chamados melanoidinas, que são formados pela reação de *Maillard* e compostos fenólicos (ácido tânico e húmico). Esses compostos são altamente recalcitrantes, ou seja, persistem no solo e possuem propriedades antioxidantes (NAIK, 2008).

Tecnicamente, o que acontece com a água do rio quando a vinhaça é jogada nele é que o seu balanço de oxigênio se torna sempre negativo, tornando as águas do rio putrescíveis (GLÓRIA, 1976). O balanço de oxigênio (BO) se dá pela diferença entre a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), e o oxigênio dissolvido (OD), que é a quantidade de oxigênio que se encontra disponível nas águas e que provém do ar, da fotossíntese e da vegetação aquática. Portanto, quando em excesso, a carga orgânica da vinhaça causa a proliferação de microrganismos que esgotam o oxigênio dissolvido na água, impedindo a sobrevivência da flora e fauna aquática, também dificultando o aproveitamento desses mananciais.

3.4.1.1 Histórico de destinação da vinhaça

Na década de 1940, os efluentes eram lançados no corpo d`água sem controle adequado, evidenciando pequena preocupação em relação à questão ambiental e à capacidade de suporte de resíduos, já que os volumes gerados e o número de unidades eram pequenos (LEÃO, 2002). Com maior número de unidades industriais e, portanto, com o aumento gradativo na produção e com a preocupação em relação ao corpo receptor, passou-se a evitar o despejo direto dos efluentes nos rios. Estes, portanto, passaram a ser tratados através de processo em que se reduzia o teor de matéria orgânica e a concentração de sólidos em suspensão, e alterava-se o pH para valores entre 6,0 e 7,0. Só após esse tratamento o efluente diluído era despejado o no corpo d`água. Como a vinhaça é o principal efluente líquido muito impactante, outras medidas tiveram que ser tomadas, como a reserva de áreas específicas para recepção do resíduo (áreas de sacrifício ou despejo).

Até o final da década de 70, volumes crescentes de vinhaça eram lançados nos mananciais superficiais, principalmente nos cursos d'água como rios e ribeirões, nas proximidades das usinas. Quando essa prática foi proibida, os efeitos decorrentes já eram grandes (VIANA, 2006). Foi a partir desta década que a produção de etanol aumentou consideravelmente e a grande quantidade de produção de resíduos passou a ser um desafio

para as indústrias que deveriam adequar o seu destino (LEÃO, 2002). Nesse período, uma série de trabalhos com vinhaça foi desenvolvida, considerando-se sua alta concentração e nutrientes para as planta, bem como a possibilidade de uso em irrigação, devido seu alto teor de água. Confirmada a viabilidade, canaviais de grande escala passaram a ser o destino da vinhaça.

Na década de 1990, o uso da vinhaça passou a ser considerado fundamental, tanto para o destino do resíduo como para aumento de produtividade da lavoura de cana. Hoje, as empresas já aproveitam quase todo o volume gerado de vinhaça em fertirrigação, dependendo da topografia e distribuição de terras da usina. Para que isso fosse possível, muitos investimentos foram feitos neste período, como estações de carregamento de caminhões, tanques para áreas mais distantes, desenvolvimento de sistemas de aplicação, canais de distribuição e diversos investimentos em circuitos hidráulicos compostos de estações de bombeamento, adutoras e depósitos.

De maneira geral, a cada safra há aumento nas áreas de fertirrigação objetivando o uso racional da vinhaça, com maior produtividade agrícola e redução no uso de fertilizantes químicos. Isto tem levado o descarte de doses cada vez menores (m^3 ha^{-1}) deste resíduo, distanciando-se de valores que poderiam trazer danos, como a salinização e a contaminação do lençol freático.

Com o aumento substancial na produção de etanol no Brasil, existe também um aumento na necessidade do controle desse efluente. Diversas tecnologias estão surgindo para o reaproveitamento e/ou tratamento da vinhaça, uma vez que esse composto apresenta um grande

potencial poluidor na natureza (MANE, 2006).

3.4.1.2 Aplicação de vinhaça em áreas de plantio de cana de açúcar

Devido aos altos teores de potássio na vinhaça (Tabela 3), normalmente dispensa-se a aplicação desse nutriente nas áreas onde esse resíduo é aplicado. Então, nas áreas fertilizadas com vinhaça, e devido à inconstância na obtenção de respostas positivas à adubação nitrogenada da cana-planta (CARNAÚBA, 1990), usualmente, as unidades produtoras aplicam somente o fertilizante fosfatado no sulco de plantio de cana. Nas soqueiras, mesmo com a adição de quantidades significativas de nitrogênio junto com a vinhaça, respostas positivas são

observadas devido à complementação nitrogenada, sendo então usual a aplicação de fertilizantes nitrogenados nas soqueiras.

Independentemente do sistema de aplicação de vinhaça a ser utilizado, é de fundamental importância a existência de áreas de segurança, onde o resíduo possa ser depositado quando as demais opções de utilização não estão em funcionamento. Com isso, evita-se a descarga da vinhaça em cursos d'água, com consequentes problemas de poluição.

Os tanques das áreas de segurança são normalmente de grande superfície e pequena profundidade, que tem o objetivo de acelerar o processo de evaporação. O material pode ter utilização agrícola após a secagem, constituindo-se numa borra com elevada quantidade de matéria orgânica. Após alguns anos de uso, as áreas de segurança poderão ter utilização agrícola.

Dentre os sistemas mais utilizados para a fertirrigação com vinhaça, destacam-se o caminhão-tanque convencional e a aplicação por aspersão. Na aplicação por aspersão são utilizados o sistema de montagem direta (motobomba e aspersor canhão, sobre chassi com rodas) e autopropelido com carretel enrolador (mais difundido atualmente), podendo este ser alimentado a partir de caminhões ou diretamente de canais - responsável pela distribuição da vinhaça na área por aspersão, conforme ilustrado nas Figuras 10 e 11. Esse canhão pode ter um raio de ação que varia de 36 a 72 m. Esse sistema é semimecanizado, usando menos mão de obra que a montagem direta, mas com maior consumo de combustível.

Figura 10 - Detalhe do canal condutor de vinhaça - motobomba acoplada ao carretel irrigador
Fonte: Souza, 2011

Figura 11 - Aplicação de vinhaça por aspersão através de um conjunto motobomba instalado ao longo de um canal

Fonte: Souza, 2011

A condução da vinhaça até a lavoura por meio de canais depende da topografia do terreno. Se esta última for desfavorável, o transporte é feito por veículos-tanque.

O transporte da vinhaça por meio de veículos-tanque + carretel irrigador leva em consideração, além da declividade do terreno, a distância da área de aplicação até a Usina, sendo que se esta distância for grande, a aplicação da vinhaça torna-se inviável economicamente devido ao elevado custo do transporte. Quando transportada em veículos-tanque a vinhaça pode ser distribuída por aspersão com carretel irrigador ou por chuveiro. No primeiro caso, acopla-se no veículo-tanque uma motobomba, a qual alimenta o carretel e este distribui a vinhaça por aspersão, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Aplicação de vinhaça por aspersão através de carretel irrigador acoplado a um caminhão-tanque

Fonte: Souza, 2011

Já no último caso, são utilizados caminhões-chuveiros, nos quais a vinhaça é distribuída na área por gravidade, caindo diretamente ao solo, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Distribuição da vinhaça por meio de caminhão-chuveiro

Fonte: Foto do Autor, 2009

A fertirrigação direta com caminhões-tanque foi muito difundida, mas suas limitações (maior compactação de solos, impossibilidade de aplicação em áreas com cana-planta, dificuldades em dias de chuva, baixa uniformidade de distribuição, custos) levaram à evolução para o sistema de pivô central, que proporciona maior uniformidade de distribuição; mas os custos são ainda elevados, inclusive pela necessidade de materiais resistentes à corrosão pela vinhaça. O sistema deve ser do tipo pivô rebocável. Sistema fixo é inviabilizado pelas pequenas lâminas correspondentes à fertirrigação.

3.4.2 Torta de filtro

As impurezas presentes no caldo de cana são removidas através de floculação ou decantação, resultando um lodo rico em açúcar, que é tratado em filtro rotativo a vácuo, que

extrai o açúcar residual através de lavagem e filtração. Resulta desta operação a torta de filtro, um resíduo sólido produzido na proporção de 1% a 4 % do peso da cana moída.

Este resíduo é, então, prensado para reduzir sua umidade, que inicialmente é de 75 %. A torta de filtro é produzida de forma contínua, sendo que cada tonelada de cana produz 40 kg de torta (CTC, 2008).

As usinas têm empregado a torta de filtro como fertilizante diretamente na lavoura, podendo ser promovida, antes, a compostagem. Esse resíduo tem sido aplicado em áreas de reforma (pré-plantio), plantio, na soqueira em superfície do solo e em áreas de viveiros de mudas de cana de açúcar. No sulco de plantio, são colocadas de 20 a 30 t ha^{-1}, o que dá um valor de 80 a 120 kg ha^{-1} de N, pois o teor de N na torta é de cerca 0,4 %, e numa quantidade de água de 15 a 22,5 t ha^{-1}.

Detalhes da retirada da torta de filtro, da compostagem e da aplicação no sulco de plantio estão ilustrados nas Figuras 14,15 e 16.

Figura 14 - Retirada da torta do filtro – prensa
Fonte: Foto do Autor - Usina Costa Pinto, 2007

Após a retirada da prensa, a torta de filtro é levada para a compostagem (Figura 14).

Figura 15 - Compostagem da torta de filtro

Fonte: Foto do Autor - Usina Costa Pinto, 2007

Figura 16 - Aplicação da torta de filtro no sulco de plantio

Fonte: Foto do Autor - Usina Costa Pinto, 2007

A torta tem sido utilizada como fonte de matéria orgânica, pois promove maior retenção de água. Na região onde ela é aplicada, é mantida alta a Capacidade de Troca Catiônica (CTC), apropriada para retenção de cátions, como o potássio, cálcio e magnésio. O fósforo é protegido dos constituintes fixadores dos solos e, portanto mantêm-se em forma disponível para as plantas num período mais longo.

As análises químicas do resíduo têm revelado que se trata de um material relativamente pobre em constituintes minerais. Assim, a torta úmida apresenta ao redor de

70% a 75% de umidade, 25% a 30% de matéria orgânica e 1 a 2% de constituintes minerais. Contudo, a aplicação de dosagens elevadas pode fornecer quantidades relativamente grandes de elementos que, de uma maneira geral, podem complementar as adubações minerais.

A matéria orgânica oferece condições adequadas para desenvolvimento dos microrganismos do solo. Devido a sua capacidade de reter água e desprendimento de calor, favorece também a brotação da cana de açúcar. A composição físico-química da torta de filtro é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição físico-química da torta de filtro

Parâmetros	Valores
Fibra	6 a 10%
Umidade	74,90%
Açúcar	2 a 4%
Sólidos solúveis	2 a 4%
Sólidos não solúveis	17 a 25%
Nitrogênio (matéria seca)	1,41%
Fosfato (P_2O_5) (matéria seca)	1,94%
Potássio (K_2O) (matéria seca)	0,39%
Cálcio (CaO) (matéria seca)	2,10%
Magnésio (MgO) (matéria seca)	0,89%
Carbono (matéria seca)	39,60%
pH	6,4

Fonte: Centro de Tecnologia Copersucar, 1981

3.4.3 Bagaço

O bagaço é um resíduo sólido resultante do processo de extração do caldo nas moendas. Sua quantidade gerada no processamento industrial depende do teor de fibra na cana, cuja faixa de variação é de 11 a 14%, com um valor médio de aproximadamente de 12,5% (COPERSUCAR, 2002), ou seja, 250 kg de bagaço por toneladas de cana com um teor médio de umidade de 50%.

A composição química do bagaço varia de acordo com vários fatores, dentre eles, a variedade da cana, o tipo de solo de plantio, as técnicas de colheita e de manuseio. O bagaço é uma mistura de fibras celulósicas, matéria inorgânica insolúvel (cinzas), matéria solúvel em

água e água. Sua composição é variável, sendo que na Tabela 5 estão apresentados os valores médios característicos deste resíduo.

Tabela 5 - Características do bagaço

Parâmetros	Valores
Carbono	49,50%
Hidrogênio	6,20%
Oxigênio	44,30%
Sacarose	1 a 4%
Cinzas	2,50%
Umidade	50 a 52%

Fonte: CTC, 2008

Além da água, o bagaço contém a fibra, constituída por celulose, que forma a "fibra" do bagaço e matérias em solução na água (proveniente da embebição e do caldo), composta por açúcar e impurezas (entre 2 e 4%). O valor deste índice, designado por *f*‘ (fibra % de bagaço) frequentemente é da ordem de 46%.

A utilização do bagaço como combustível é a mais usual, ressaltando-se que a quantidade gerada é suficiente para atender toda a energia necessária para o processamento industrial e haver excedente. Sua movimentação é feita por esteiras, que alimentam diretamente as caldeiras, sendo o excedente armazenado em pátio para utilização nas paradas por chuva e início de safra. A sobra de bagaço da safra é normalmente coberta com lona para ser utilizada na safra seguinte.

De um modo geral, como combustível, pode-se considerar que o bagaço apresenta as seguintes características: (i) produção de bagaço por tonelada de cana processada: 250 a 260 kg tonelada cana; (ii) energia útil contida no vapor gerado: 1.147 kcal kg^{-1} de bagaço; (iii) produção de vapor por kg de bagaço: 1,9 kg vapor kg^{-1} de bagaço; (iv) poder calorífico inferior (bagaço úmido): 1.800 kcal kg^{-1}; e (v) poder calorífico inferior (bagaço após secagem): 2. 525 kcal kg^{-1}.

3.4.4 Fuligem e cinzas de caldeiras

A combustão de bagaço em caldeiras gera a emissão de 4.000 a 6.000 mg Nm^{-3} de material particulado, conhecido por fuligem. Um crescente número de unidades produtoras vem adotando o uso de equipamentos lavadores de gases com o intuito de reduzir consideravelmente esta emissão na atmosfera, resultando em um líquido contendo sólidos decantáveis, que é tratado em decantadores/flotadores com remoção contínua de resíduos.

O resíduo da limpeza da fornalha da caldeira (cinzas e areias), que é feito via hídrica, também é enviado para este circuito. A produção deste resíduo é da ordem de 15 a 25 kg por tonelada de cana, sendo normalmente disposta na lavoura juntamente com a torta, como fertilizante, conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 - (A) Compostagem das cinzas da caldeira (cor preta) com a torta de filtro (cor marrom) e; (B) Descarregamento das cinzas da caldeira na lavoura

Fonte: Fotos do Autor - Usina Costa Pinto, 2007

A composição aproximada de cinzas e fuligem é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química de cinzas e fuligem

Material	Teor H_2O	SiO_2	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO
			%			
Cinza caldeira	-	85	0,9	1,7	0,6	1
Fuligem	70	38-72	0,5-1,0	0,7-3,0	0,4-0,8	0,6-1,5

Fonte: APTA, 2009

3.4.5 Outros resíduos sólidos

O lixo comum é um resíduo sólido resultante das atividades de escritório, sanitários e varrição, compostos principalmente de papéis, estopa, bagacilhos e plásticos. São coletados e transportados normalmente para a área de aterro (valas sanitárias). Em alguns casos são dispostos nos aterros sanitários do próprio Município. Já o lixo do laboratório é composto por embalagens e papéis de filtro das análises químicas do caldo. Embora as usinas não utilizem mais o subacetato de chumbo como auxiliar de filtração para análises químicas, que conferia periculosidade aos papéis de filtro, todos os resíduos de laboratório são acondicionados em tambores e queimados na caldeira a bagaço. Ressalta-se que em substituição ao subacetato de chumbo (substância que faria com que este resíduo fosse classificado como perigoso), as usinas passaram a utilizar cloreto de alumínio.

Outro resíduo sólido é o lodo de fossas. Normalmente, os sanitários são providos de fossas sépticas e sumidouros, sendo o esgoto sanitário da indústria e de eventuais colônias tratados conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Quando necessário, limpezas na fossa séptica são realizadas, sendo o lodo disposto superficialmente no solo para secagem, ou encaminhados para a estação municipal de tratamento de esgotos disponível.

Têm-se como sucatas ferrosas e não ferrosas os resíduos resultantes da manutenção da indústria, troca de equipamentos, tubos e chaparias. As sucatas ferrosas, principalmente aço carbono e aço inox, são dispostas a granel em local aberto. Já as sucatas não ferrosas, principalmente o cobre e o bronze, são armazenadas em tambores em local próprio. Este material é comercializado no decorrer da safra.

O material inorgânico, principalmente terra, que vem para a indústria agregado à cana inteira, principalmente em função do carregamento mecânico é removido na lavagem de cana. Normalmente, esta terra é decantada em caixas de areia retangulares de concreto ou bombeada para lagoas de lodo, quando o sistema é decantador circular contínuo. A terra decantada nas caixas é removida por pás carregadeiras e transportada por caminhões basculantes para a lavoura para recuperar áreas erodidas, aterros, acertos de terrenos e taludes. A quantidade média deste resíduo é estimada (base seca) em cerca de 3% do peso da cana.

Os óleos lubrificantes usados são considerados como classe I (perigosos), de acordo com a classificação da ABNT, e coletados normalmente em tambores de 200 litros, sendo parte reutilizada na lubrificação de correntes e rodetes das correias transportadoras da usina. A parte restante é armazenada e vendida para empresas recuperadoras de óleo. A Tabela 7

apresenta um resumo dos resíduos sólidos gerados pela agroindústria sucroalcooleira. A produção específica é bem variável sendo apresentados números básicos que dão uma ordem de grandeza, baseados em sua maioria nas médias encontradas nas usinas, que devem ser utilizados com critérios, pois variam caso a caso (porte da usina, características do processo e da matéria prima).

Tabela 7 - Resíduos sólidos da indústria sucroalcooleira

Resíduos Sólidos	Produção Específica	Frequência	Classe	Acondicionamento	Armazenamento	Tratamento, Reutilização, Disposição
Bagaço	0,25 t t^{-1} cana	Contínua	II	Granel	Céu aberto	Combustível
Cinzas e fuligem	15 kg t^{-1} bagaço	Contínua	II	Moega	Granel	Lavoura
Torta	40 kg t^{-1} cana	Contínua	II	Moega	Granel	Aplicação no solo *in natura* ou após compostagem
Lixo comum	variável	Diária	II	Caçamba	-	Aterro
Lixo laboratório	variável	Diária	I	Tambor	-	Queima na caldeira
Lodo fossa séptica	0,3 kg/pessoa dia	Anual	II	Tanques	-	Lavoura
Sucatas ferrosas	variável	Anual	III	Granel	Céu aberto	Comercialização
Sucatas não ferrosas	variável	Anual	III	Tambor	Almoxarife	Comercialização
Terra da lavagem de cana	3% do peso da cana	Anual	III	Granel	Lavoura	Áreas de aterro (lavoura)
Óleos lubrificantes usados	variável	Anual	I	Tambor	Almoxarifado	Reutilização na indústria e comercialização

Fonte: CTC, 2008

3.5 Concentração da vinhaça

Há três meios principais de diminuir a proporção de vinhaça em relação ao etanol produzido nas destilarias: (i) concentrar a vinhaça *in natura* pela evaporação da água nela contida; (ii) reciclar a vinhaça utilizando parte dela na diluição do caldo a ser fermentado e; (iii) desenvolver novas linhagens de leveduras que suportem teores de etanol mais elevados no mosto.

A concentração da vinhaça significa retirar água (evaporação) desse efluente com o uso de vapor, sem perda dos sólidos nelas contidos, com consequente redução de volume. Concentrar a vinhaça permite a viabilização de sua distribuição para áreas distantes (>30 km) e em terras descontínuas, a adequação à norma *P4. 231*, além da sua utilização econômica (fertilizante) e a recuperação da água nela contida, via tratamento, que poderá ser utilizada no processo de industrialização da cana de açúcar. As desvantagens são consumo energético elevado e incrustações nos equipamentos, que acarreta no uso de insumos para limpeza.

A Figura 18 mostra a vinhaça concentrada, e na Tabela 8, os teores de nutrientes em ambas as vinhaças - concentrada e *in natura*.

Figura 18 - Detalhe da vinhaça concentrada

Fonte: Foto do Autor - Usina Santa Elisa, 2005

Tabela 8 - Teores de nutrientes nas vinhaças concentradas e *in natura*

Nutrientes (kg m^{-3})	K_20	P_2O_5	CaO	MgO	M.O.	N total
Vinhaça *in natura* (2004)	4,79	0,23	1,21	0,39	7,65	0,78
Vinhaça Concentrada (2004)	44,81	4,18	12,37	3,07	66,78	8,49
Vinhaça *in natura* (2005)	4,60	0,18	0,72	0,81	-	0,46
Vinhaça Concentrada (2005)	40,72	1,85	6,26	10,59	-	85,83

Fonte: Usina Santa Elisa, 2005

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

Portanto, como mostra a Figura 19, quanto mais próximo o campo, a distribuição da vinhaça *in natura* torna-se mais vantajosa, quanto mais distante a lavoura, melhor o uso da concentração da vinhaça (questão econômica e ambiental).

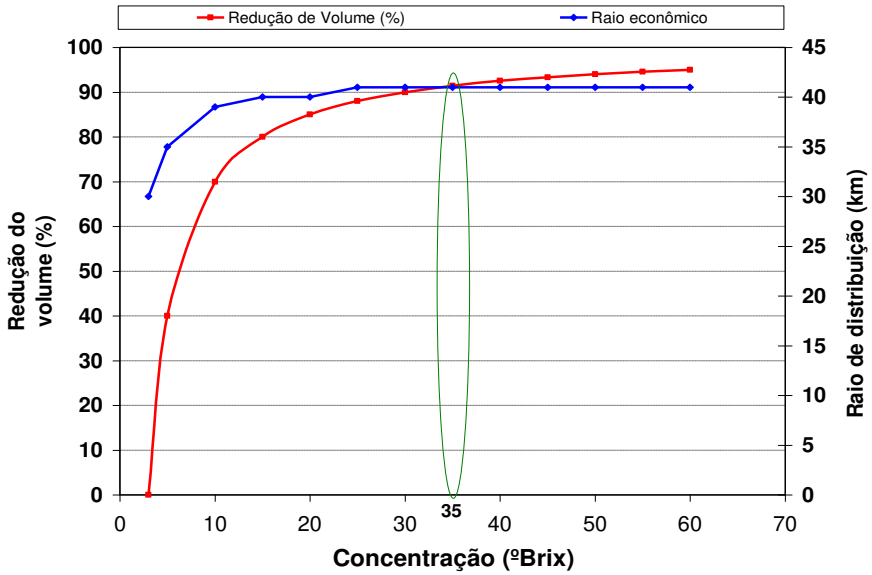

Figura 19 - Raio econômico de aplicação da vinhaça x Concentração x Redução do volume
Fonte: Germek e Feigl, citados por FREIRE e CORTEZ, 2000

Há de se ressaltar que, embora represente custos elevados de investimento e um balanço energético desfavorável se não operar integrada à destilaria. A concentração da vinhaça é uma solução tecnicamente viável e altamente criativa, que deverá ser adotada por muitas empresas do setor sucroalcooleiro nos próximos anos. A Figura 20 mostra os detalhes da aplicação de vinhaça concentrada na lavoura de cana de açúcar.

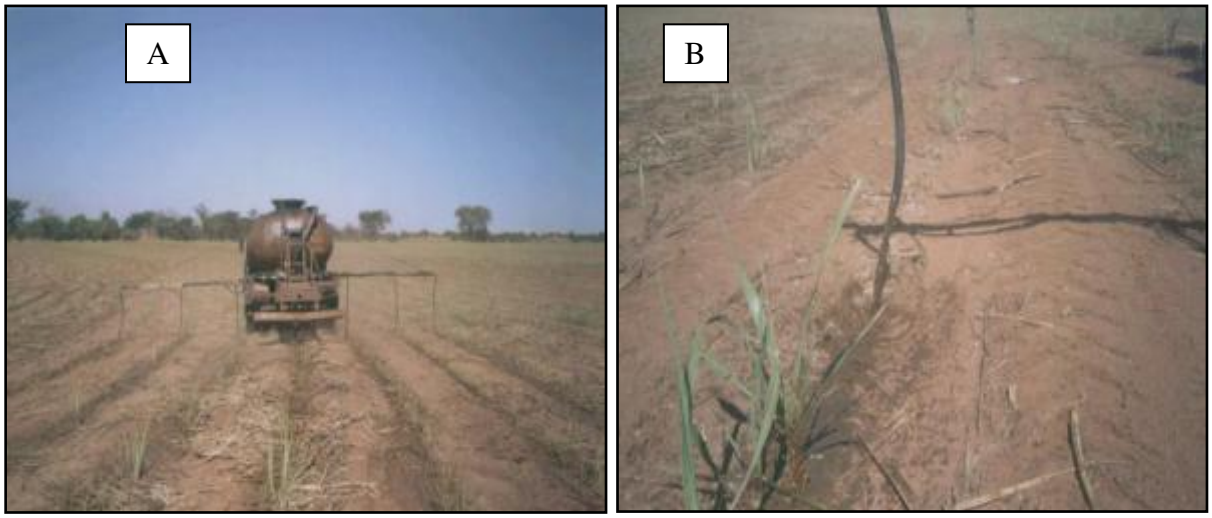

Figura 20 - (A) Aplicação de vinhaça concentrada e; (B) Detalhe da vinhaça concentrada aplicada na cana

Fonte: Fotos do Autor - Usina Santa Elisa, 2005

Quanto ao processo de evaporação, destaca-se que todo evaporador consiste em uma superfície de aquecimento onde ocorre a transferência de calor do fluido de aquecimento para o fluido de processo, e de um meio onde ocorre a separação do vapor evaporado do fluido concentrado. O que difere os diferentes tipos de evaporadores é como a separação entre o vapor vegetal e o fluido concentrado é feita (FRANCO, 2001). A Figura 21 mostra o esquema típico de um evaporador.

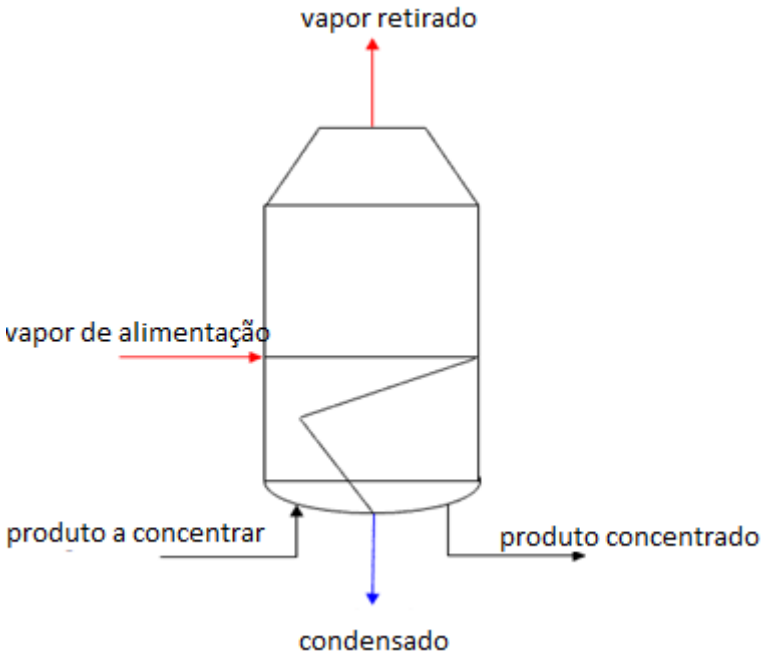

Figura 21 - Esquema típico de um evaporador

Fonte: Adaptado de Franco, 2001

Os evaporadores são grandes consumidores de energia, em vista disso, são utilizadas várias estratégias para se diminuir o consumo de energia, como o sistema de evaporação em múltiplos efeitos. Neste arranjo, um evaporador é montado sequencialmente ao outro, de modo que o vapor vegetal de um evaporador (primeiro efeito) é utilizado para aquecer outro evaporador (segundo efeito) e assim sucessivamente. O vapor evaporado no último efeito passa por um condensador, encerrando o processo.

A Figura 22 apresenta o esquema ilustrativo de um evaporador de múltiplo efeito.

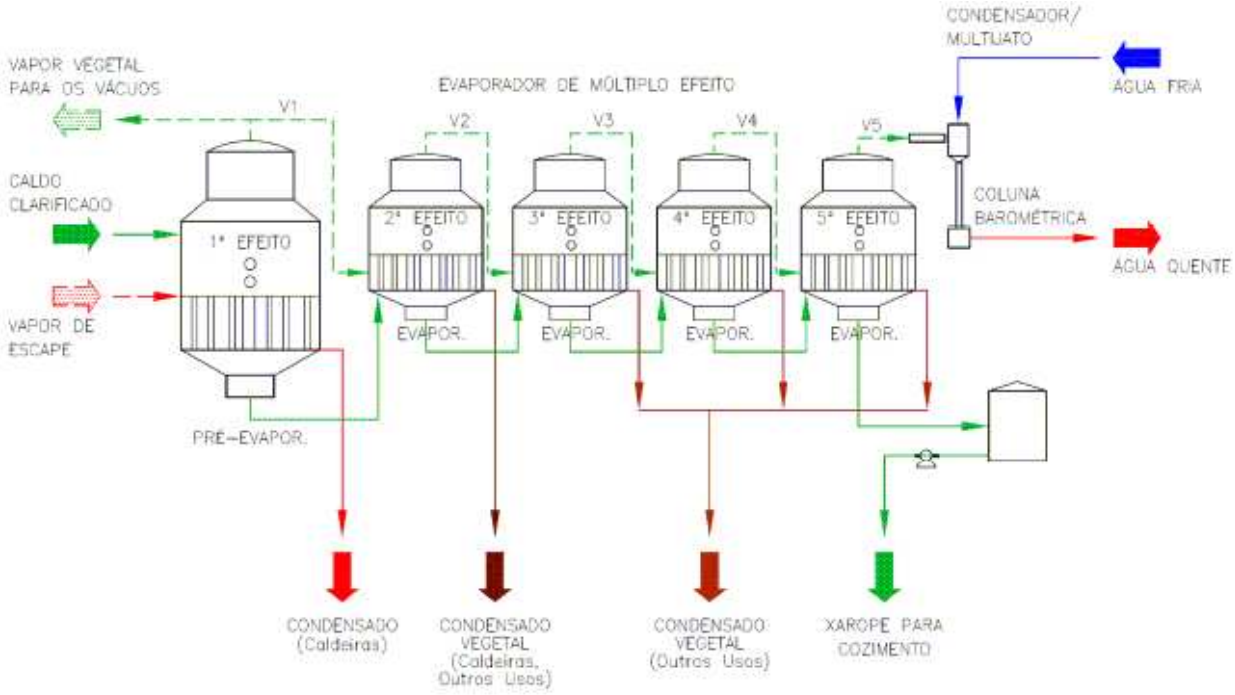

Figura 22 - Esquema ilustrativo de um evaporador de múltiplo efeito

Fonte: Adaptado de Elia Neto e Shintaku, 2009a

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

Ressalta-se que quanto maior o número de efeitos, maior a redução do consumo de energia. Este arranjo permite utilizar somente o calor fornecido ao primeiro efeito (vapor de alimentação) para realizar todo o processo de evaporação. Além da economia de vapor, este arranjo permite uma economia de água de resfriamento no condensador, já que este último é utilizado para condensar somente o vapor vegetal gerado no último efeito. Contudo, uma maior quantidade de números de efeitos ocasiona menores diferenças de temperatura empregadas como força motriz em cada efeito, causando um aumento na área de troca térmica necessária, aumentando os custos fixos. Assim, a escolha do número de efeitos é definida a partir de um balanço econômico entre a economia de vapor e água de resfriamento e o custo do investimento.

Os primeiros registros sobre concentração de vinhaça iniciam-se em 1954, quando a empresa austríaca *Vogelbusch* instalou um primeiro concentrador usando evaporadores inclinados tipo termo-sifão. Logo depois, em 1958, a mesma *Vogelbusch* desenvolveu o evaporador tipo "*falling- film*", ou película fina, no qual o líquido a evaporar escorre com alta velocidade pelas paredes internas dos tubos do trocador, reduzindo o seu tempo de permanência em contato com o vapor de aquecimento e favorecendo a resistência a incrustações. Esse tipo de evaporador se revelou logo como o mais indicado para lidar com líquidos com alto teor de sais incrustantes, como a vinhaça, e tem sido usado até hoje, se difundindo também para uso nos evaporadores de caldo nas usinas brasileiras (BIASE, 2007)

No Brasil, as duas primeiras e únicas unidades de concentração de vinhaça de que se tem notícia foram instaladas no início do Proetanol. Uma delas, a da Usina Tiúma, em São Lourenço da Mata, Pernambuco, então pertencente ao grupo Votorantim, foi projetada por uma empresa nacional, a Borag, fornecedora de equipamentos para indústrias de suco, e funcionava integrada à destilaria de etanol. Não obteve êxito devido aos problemas de incrustações e às frequentes paradas para limpeza, que atrapalhavam o funcionamento da destilaria. Tanto esse concentrador como a própria usina se encontram hoje desativadas.

A outra unidade foi instalada em Sertãozinho, no Estado de São Paulo, na Usina Santa Elisa, em 1976, pela Conger S.A., então licenciada da *Vogelbusch*, um concentrador para a vinhaça proveniente de um aparelho com capacidade de produção de 120 m^3 dia^{-1} de etanol, e de 1.440 m^3 dia^{-1} de vinhaça. Na época, utilizando melaço para fermentação sem prever a utilização de caldo direto, o projeto da concentração foi elaborado para alimentação

de

70 m³ h^{-1} de vinhaça com 6% de sólidos, concentrando-a até 60° Brix. Essa concentração operava em quádruplo efeito com um termocompressor de vapor. Seu condensador final era do tipo barométrico, com bomba de vácuo, e os vapores a condensar do último efeito tinham contato direto com a água utilizada, o que causava alguns problemas pela contaminação apresentada no circuito de água das torres de resfriamento.

Os evaporadores do primeiro ao terceiro efeito eram do tipo película fina de fluxo descendente, e possuíam um controle automático de fluxo para injeção rápida de água quente, para lavagem dos tubos em caso de falta de líquido, como nos casos de falta de energia elétrica e parada das bombas mecânicas ou de entupimento de tubulações. O trocador do último efeito era do tipo recirculação forçada, ou "*flash*", para possibilitar a operação no estágio final de concentração de 45° a 60° Brix, fase onde, naturalmente, ocorrem os maiores problemas de incrustações (sais que se depositam na parede dos tubos), que reduz a eficiência da evaporação, e faz com que a planta ou o equipamento (se tiver reserva) pare para se fazer a limpeza.

A unidade ficou parada em função do alto consumo de energia, mas em 1999 com a implantação do sistema de cogeração de energia elétrica na usina, a unidade passou a funcionar continuamente, produzindo cerca de 3 m^3 h^{-1} de vinhaça concentrada. O sistema permitiu que a usina reduzisse o custo de transporte da vinhaça para as regiões mais afastadas, e pudesse ter a flexibilidade de dosar a concentração de cada aplicação de vinhaça, conforme as características do solo. Para a aplicação da vinhaça concentrada ao solo, foi desenvolvido um caminhão tanque com bomba de pressurização e barra aplicadora de sete metros de largura, que possibilitou a aplicação em cerca de 5.000 ha (BARBOSA, 2006; BIASE, 2007).

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

Para concentrar a vinhaça de maneira eficiente, a tecnologia T.A.S.T.E. (*Thermally Accelerated Short Time Evaporation system*) tem como princípio de evaporação de água, a névoa turbulenta descendente com aceleração térmica, que consiste em explodir termicamente o líquido de entrada por meio de um "*flash*" parcial, resultando numa mistura de vapor e pequenas partículas líquidas (névoa). Esta névoa é gerada em cada um dos cones de distribuição que alimenta os tubos de cada um dos estágios do evaporador. O produto sob a forma de névoa cai livremente através dos tubos abertos, absorvendo o calor e evaporando a água, aumentando mais ainda o seu volume. Ele é então acelerado termicamente chegando a velocidades muito altas no final dos tubos, conforme ilustrado na Figura 23.

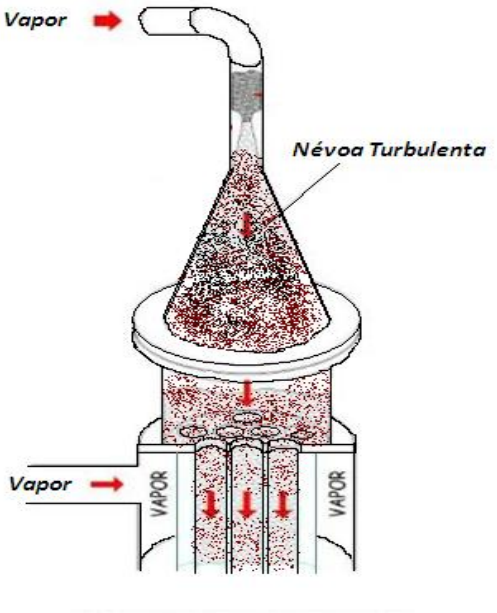

Figura 23 - Evaporador do tipo névoa turbulenta
Fonte: Boscariol, 2011

Os evaporadores de concentração de vinhaça possuem múltiplos efeitos a vácuo (até 7 efeitos - vide item 3.5) e podem reduzir o volume deste resíduo em até 6 vezes, sem consumo adicional de vapor.

Nesse sistema, o vapor de aquecimento é admitido no primeiro efeito (vapor alcoólico proveniente da destilaria), e os demais efeitos são aquecidos pelos vapores oriundos do efeito anterior. No último estágio de evaporação, o vapor é condensado em condensador barométrico de contato direto.

Detalhes do processo de concentração de vinhaça com integração energética estão ilustrados nas Figuras 24 e 25.

A vinhaça concentrada (até 65° Brix) é o primeiro passo para a produção do biofertilizante organomineral BIOFOM.

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

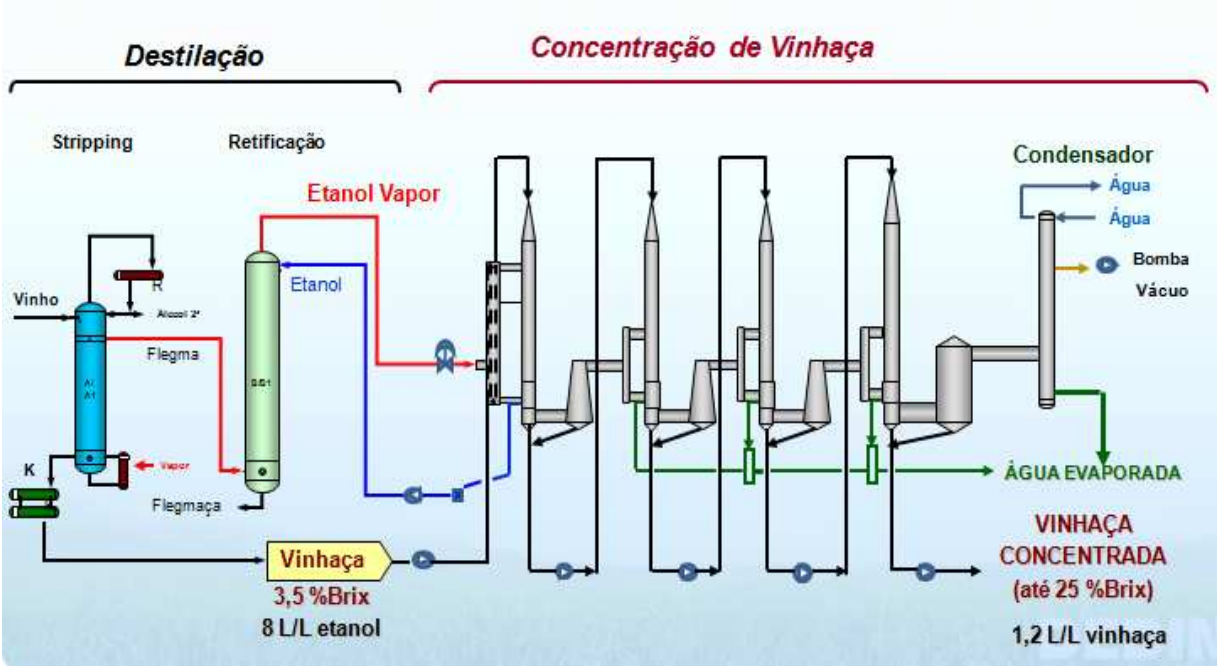

Figura 24 - Concentração da vinhaça com integração energética com a destilaria

Fonte: Boscariol, 2011

Figura 25 - Visão geral do concentrador de vinhaça com integração energética
Fonte: Foto do Autor - Usina Costa Pinto, 2011

O sistema é compacto, com equipamentos leves (aço inoxidável), de fácil instalação e limpeza, uma vez que o aquecimento e evaporação rápida minimizam a ocorrência de incrustação. O equipamento possui sistema de limpeza CIP (*Clean in Place*), processo 100% automático, que utiliza produtos químicos para eliminação de resíduos. Por permitir a alta eficiência térmica, há menor consumo de energia.

Este processo de concentração de vinhaça também apresenta vantagens financeiras, uma vez que há redução significativa nos custos com transporte deste resíduo à lavoura, seja este por bombeamento ou via transporte veicular.

3.6 A Água no Processo de Açúcar e Etanol

A água é um recurso natural essencial, seja como componente de seres vivos, seja como meio de vida de várias espécies vegetais e animais, como elemento representativo de valores socioculturais e como fator de produção de bens de consumo e produtos agrícolas (BASSOI e GUAZELLI, 2004).

Durante muito tempo a água foi utilizada sem tratamento, sendo que esgotos domésticos e industriais eram lançados nos rios e mares indiscriminadamente. Hoje, a água é

encarada como um recurso renovável, porém finito, já que a poluição e o uso dos recursos hídricos aumentaram em demasia, não permitindo sua reposição a uma velocidade compatível ao consumo.

Há uma ideia generalizada, entre as entidades ligadas aos recursos hídricos e ambientais, de que a agroindústria sucroalcooleira é uma grande consumidora de água, o que realmente procede, em face dos valores históricos de captação que o setor utilizava no processo industrial. Contudo, essa ideia não se aplica à produção de cana que, diferentemente da maioria dos outros países produtores de açúcar e etanol, pois no Brasil não se utiliza água para a irrigação plena dos canaviais (CTC, 2008). Praticamente toda a produção de cana de açúcar no estado de São Paulo é desenvolvida sem irrigação (DONZELLI, 2005).

Para elucidar a ordem de grandeza envolvida na produção de açúcar e etanol no Brasil, de acordo com a UNICA (2008), 325 usinas operaram na temporada 2006/07, processando 427 milhões de toneladas de cana, cultivadas em uma área de 5,3 milhões de hectares (8,8% do arável área no Brasil). Do montante foram produzidos 18 milhões de metros cúbicos de bioetanol e 31 milhões de toneladas de açúcar. Para a produção desses volumes de açúcar e etanol foram necessários cerca de 768 milhões de metros cúbicos de água, sendo gerados cerca de 214 milhões de metros cúbicos de vinhaça e 17 milhões de toneladas de torta de filtro. Segundo Elia Neto (2009), o consumo médio de água em usinas com destilaria anexa, atinge cerca de 22 m³/t cana conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Uso médio da água: unidades produtoras de açúcar e etanol

TIPOS DE UNIDADES	USINA COM DESTILARIA ANEXA	USINAS APENAS DE AÇÚCAR	DESTILARIA AUTONÔMA
Volumes Totais Médios de Água Necessários	22 m³/t cana total	30 m³/t cana total	15 m³/t cana total

Fonte: Elia Neto e Shintaku, 2009

Além da sua utilização na lavagem da matéria-prima, a água também é utilizada no processamento da cana de açúcar como fluido de aquecimento, resfriamento, para geração de vapor, preparo de soluções, extração de sacarose da cana, controle de emissão de material particulado e limpeza de equipamentos.

Usualmente, os circuitos de lavagem de cana, formação de vácuo e resfriamento da fermentação são circuitos fechados. Porém, o circuito global hídrico não é fechado, pois dificilmente há tratamento das águas residuárias e da vinhaça, ou seja, há perdas que acarretam a necessidade de captação de água. As águas residuárias e a vinhaça são usualmente enviadas para a lavoura através do sistema de fertirrigação.

3.7 Legislação ambiental

Pela Resolução CONAMA nº 237/97, as indústrias são obrigadas a se adequarem ao procedimento de licenciamento ambiental. No Estado de São Paulo, pela Resolução da Secretaria do Meio Ambiente nº 42/2006, a instalação de nova indústria com capacidade de moagem igual ou superior a 1.500.000 toneladas de cana de açúcar por ano, deve ser precedida do pedido de licenciamento acompanhado do EIA-RIMA. Na prática, esse tamanho abrange todos os novos projetos que serão instalados no estado nos próximos anos.

O EIA-RIMA consiste em um minucioso trabalho que abrange a descrição do empreendimento, do processo produtivo, inclusive dos produtos, subprodutos e da geração de resíduos e efluentes, e a avaliação dos impactos ambientais, inclusive potenciais, na área do empreendimento, em seus arredores e na respectiva região e ainda a apresentação de propostas de redução desses impactos.

O licenciamento é realizado, no Estado de São Paulo, pela Secretaria do Meio Ambiente (SMA), por meio de seus departamentos e entidades subordinadas: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Departamento de Avaliação de Impacto Ambiental (DAIA) e Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais (DEPRN). De forma suplementar, as normas de São Paulo que tratam do licenciamento são a Lei nº 997/76, regulada pelo Decreto nº 8.468/76, e diversas outras normas editadas posteriormente.

No procedimento de licenciamento são previstas três espécies distintas de licença: a prévia (LP), aprovando a localização e a concepção do empreendimento, atestando a viabilidade ambiental, e estabelecendo requisitos e exigências que deverão ser atendidos para a obtenção das seguintes licenças; a de instalação (LI), para a instalação do empreendimento; e a de operação (LO), para início das atividades do empreendimento. Durante o procedimento, podem ser realizadas audiências públicas para discussão do empreendimento com a comunidade.

As LO têm prazo de validade (3 anos para a fabricação de açúcar e 2 anos para a fabricação de etanol) e, para sua renovação, o empreendimento deverá demonstrar que permanece atendendo a normas ambientais estaduais e federais.

3.7.1 Aplicação de vinhaça em solo agrícola e o uso das águas

A evolução da legislação pertinente à disposição da vinhaça data de 1978. As Portarias MINTER 323 (1978) proibiram o lançamento de vinhaça nos mananciais superficiais; As Resoluções CONAMA 0002 (1984) e 0001 (1986) determinaram respectivamente os estudos e elaboração de normas para controlar os efluentes das destilarias de etanol e a obrigatoriedade do EIA e RIMA para as novas unidades ou ampliações. A Lei nº 6.134, 1988, art. 5º do Estado de São Paulo determinou que os resíduos das atividades (industriais e outras) não poderiam poluir as águas subterrâneas.

Até o final dos anos 1970, quando a produção de etanol ainda era relativamente pequena, não existia legislação referente ao assunto; a prática consistia no despejo da vinhaça nos mananciais superficiais, aumentando a carga orgânica dos mesmos. Isto mudou a partir de 1978, com o redirecionamento total da vinhaça para a fertirrigação. Recentemente, em São Paulo, a Secretaria do Meio Ambiente e o setor produtivo desenvolveram uma Norma Técnica P4.231 com o objetivo de regulamentar a aplicação da vinhaça no Estado de São Paulo. Esta norma técnica busca uma forma segura de aplicação da vinhaça, definindo os locais permitidos, as doses, o revestimento de canais mestres e depósitos etc., e considerou os resultados de anos de estudos na busca de processos seguros em relação aos vários aspectos da proteção ambiental.

A Norma Técnica CETESB-P4.231 (versão Janeiro/2005), objetivou normatizar os critérios e procedimentos para aplicação de vinhaça no solo agrícola no estado de São Paulo, estabelecendo que o teor de concentração máxima de potássio no solo não pode exceder 5% da capacidade de troca catiônica do solo (CTC). Quando esse limite for atingido, a aplicação da vinhaça fica restrita a reposição desse nutriente em função da extração média pela cultura, que é de 185 kg de K_2O por hectare por corte.

Os sistemas anteriormente utilizados (área de sacrifício e sulcos de infiltração) foram eliminados por não promoverem o aproveitamento integral da vinhaça e por risco de contaminação de águas subterrâneas.

Anualmente, as indústrias paulistas são obrigadas a apresentar à CETESB um plano de aplicação da vinhaça demonstrando o atendimento da Norma, plano esse que será usado em ações de fiscalização.

A captação da água superficial ou subterrânea é controlada pelo estado, dependendo da concessão de outorga pelo órgão ambiental competente. No estado de São Paulo, essa outorga é dada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica por força do Decreto Estadual nº 41.258/96. A partir de 2007, o Estado de São Paulo iniciou a cobranças dos usuários de recursos hídricos pelos volumes de captação, consumo e lançamento de efluentes com carga orgânica. Essa cobrança se dá por força da Lei Estadual Lei 12.183/05, regulamentada pelo Decreto Estadual nº 50.667/06. Esta cobrança é limitada a: R$ 0,01 m^3 captado; R$ 0,02 por m^3 consumido; e ao triplo da soma dos dois primeiros para cada m^3 de efluente lançado de volta nos corpos d'água.

3.8 Biofertilizante Organomineral (BIOFOM)

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

A mistura de dois ou mais reguladores vegetais com outras substâncias (aminoácidos, nutrientes e vitaminas), é nomeada bioestimulante (CASTRO e VIEIRA, 2003). A utilização dessas substâncias aumenta em importância, na medida em que se aumenta o potencial genético das culturas, e se elimina fatores limitantes do clima e do solo, objetivando altos rendimentos e a melhoria da qualidade do produto colhido (FLOSS e FLOSS, 2007).

Durante o ciclo de desenvolvimento das culturas esses compostos, dependendo de sua composição, concentração e proporção das substâncias, estimulam o crescimento vegetal, através de uma maior divisão, elongação e diferenciação celular e, dessa forma, aumentam a

capacidade de absorção de nutrientes e água, refletindo diretamente no desenvolvimento e na produtividade das culturas (CASTRO e VIEIRA, 2003).

Os biofertilizantes são compostos bioativos, resíduo final da fermentação de compostos orgânicos, contendo células vivas ou latentes de microrganismos (bactérias, leveduras, algas e fungos filamentosos) e por seus metabólitos, além de quelatos organo-minerais (GALBIATTI et al., 2011).

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

Com base nas definições acima, o BIOFOM se caracteriza como um biofertilizante, uma vez que todos seus componentes são de origem vegetal e seu principal elemento, a vinhaça, é produto da fermentação do caldo da cana-de açúcar, possuindo assim células vivas e microorganismos.

Na indústria sucroalcooleira, modificações nos sistemas de produção podem representar grandes otimizações no processo industrial. Por meio do reprocessamento de resíduos da cana de açúcar obtém-se um produto sólido e granular, denominado BIOFOM que pode ser formulado de acordo com as necessidades do solo e da cultura, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 - BIOFOM
Fonte: Foto do Autor, 2008

A produção de BIOFOM consiste, basicamente, na mistura das cinzas da caldeira, fuligens da chaminé, torta de filtro e da vinhaça concentrada que, posteriormente, são secados e enviados para a formulação do biofertilizante organomineral, conforme ilustrado na Figura 27.

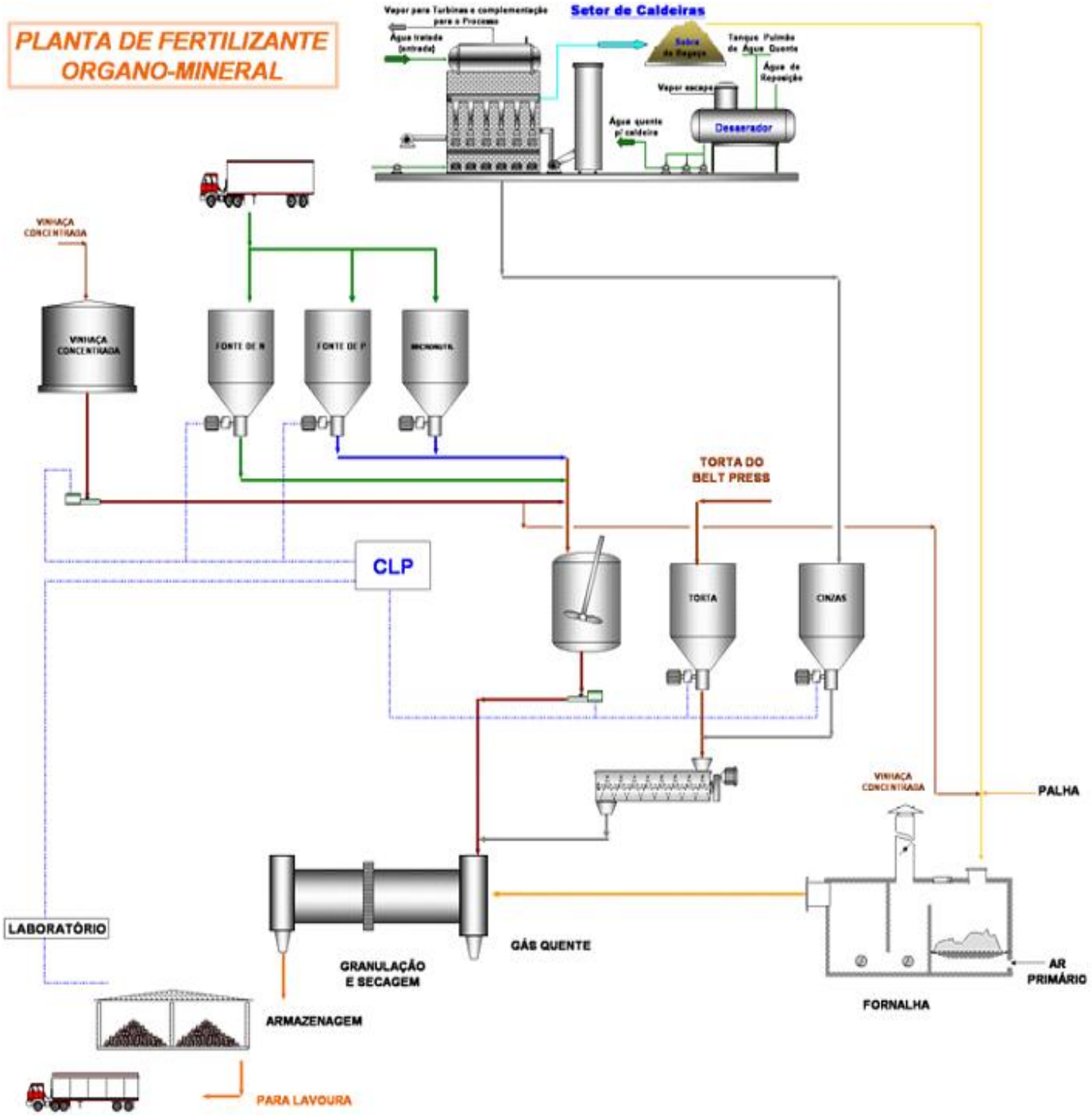

Figura 27 - Esquema ilustrativo da planta de produção do fertilizante organomineral (BIOFOM – N, P, K)

Fonte: GURGEL, 2009ab

4 MATERIAL E MÉTODOS

De forma a poder avaliar a utilização do biofertilizante organomineral (BIOFOM) como tecnologia para o uso de resíduos, através do processo de concentração da vinhaça por meio de tecnologia T.A.S.T.E. (*Thermally Accelerated Short Time Evaporation system*), foi realizado um estudo de caso envolvendo caracterização do material e testes agronômicos com milho.

O experimento com BIOFOM, utilizando milho como "Planta – Teste" foi conduzido no período de outubro a dezembro de 2008 em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da ESALQ-USP, em Piracicaba, SP, com 547 metros de altitude e situada na latitude 22º43'31" S e longitude 47º38'57" O. A casa de vegetação tem 200 m^2, com orientação Leste-Oeste e cobertura plástica, sendo o resfriamento do ambiente feito com a circulação de ar umedecido por meio do sistema *PadHouse*. A casa de vegetação utilizada no experimento está ilustrada na Figura 28.

Figura 28 - Casa de vegetação da ESALQ-USP, utilizada no experimento
Fonte: Foto do Autor, 2008

4.1 Planejamento Experimental

Para avaliar o potencial agronômico do BIOFOM, lotes deste fertilizante foram produzidos com vinhaça, torta de filtro, cinzas e fuligem e complementados com fertilizantes químicos, granulados e em pó.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, utilizando:

- Testemunha
- BIOFOM de vinhaça de melaço + caldo com 30% e 45% de ST. + Fertilizante
- BIOFOM de vinhaça de melaço + caldo com 30% e 45% de ST. + Fertilizante
- BIOFOM de vinhaça de melaço caldo com 30% e 45% de ST. + Fertilizante
- Adubo mineral
- Vinhaça + complementação

Ilustrações dos tratamentos realizados são apresentadas nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 - Ilustração dos tratamentos realizados

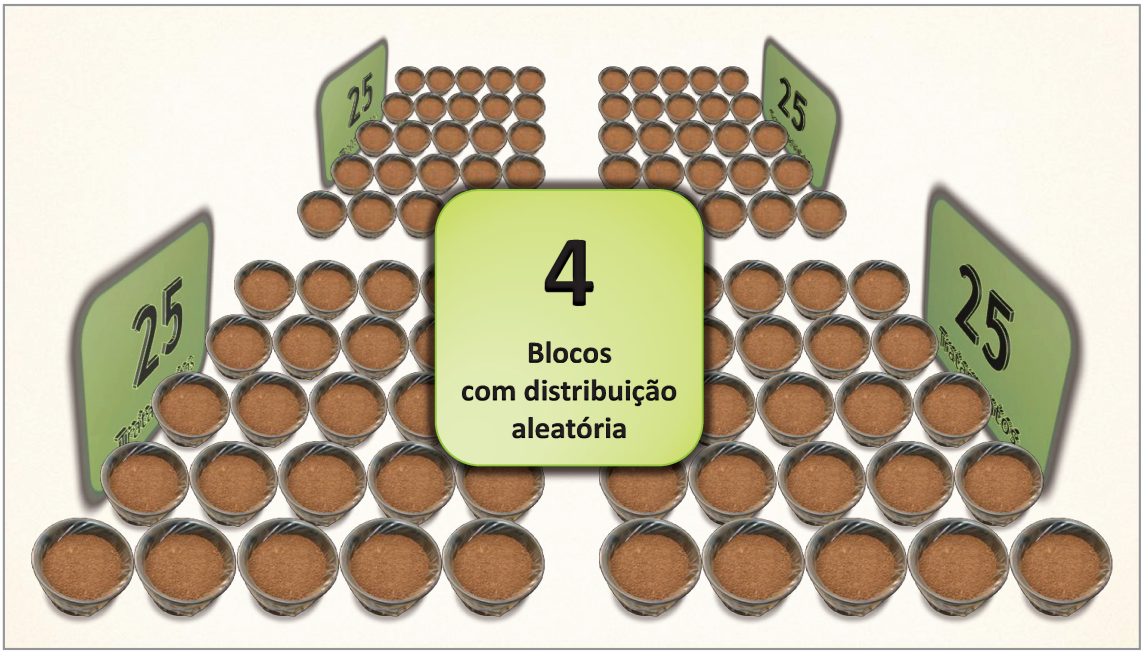

Figura 30 - Distribuição aleatória dos blocos com os tratamentos

Foram instalados 25 tratamentos com quatro repetições cada, conforme ilustrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Tratamentos do experimento de avaliação do BIOFOM com milho (planta *teste*)

Tratamento	Composição	Abreviatura
1	Testemunha - solo corrigido com calcário;	Testemunha
2	BIOFOM de vinhaça melaço+caldo (30%ST), 50% da dose do fertilizante mineral	Misto - 30-50
3	BIOFOM de vinhaça melaço+caldo (30%ST), 75% da dose do fertilizante mineral	Misto - 30-75
4	BIOFOM de vinhaça melaço+caldo (30%ST), 100% da dose do fertilizante mineral	Misto - 30-100
5	BIOFOM de vinhaça melaço+caldo (45%ST), 50% da dose do fertilizante mineral	Misto - 45-50
6	BIOFOM de vinhaça melaço+caldo (45%ST), 75% da dose do fertilizante mineral	Misto - 45-75
7	BOFOM de vinhaça melaço+caldo (45%ST), 100% da dose do fertilizante mineral	Misto - 45-100
8	BIOFOM de vinhaça de melaço (30%ST), 50% da dose do fertilizante mineral	Melaço - 30-50
9	BIOFOM de vinhaça de melaço (30%ST), 75% da dose do fertilizante mineral	Melaço - 30-75
10	BIOFOM de vinhaça de melaço (30%ST), 100% da dose do fertilizante mineral	Melaço - 30-100
11	BIOFOM de vinhaça de melaço (45 %ST), 50% da dose do fertilizante mineral	Melaço - 45-50
12	BIOFOM de vinhaça de melaço (45 %ST), 75% da dose do fertilizante mineral	Melaço - 45-75
13	BIOFOM de vinhaça de melaço (45 %ST), 100% da dose do fertilizante mineral	Melaço - 45-100
14	BIOFOM de vinhaça de caldo (30 %ST), 50% da dose do fertilizante mineral	Puro - 30-50
15	BIOFOM de vinhaça de caldo (30 %ST), 75% da dose do fertilizante mineral	Puro - 30-75
16	BIOFOM de vinhaça de caldo (30 %ST), 100% da dose do fertilizante mineral	Puro - 30-100
17	BIOFOM de vinhaça de caldo (45 %ST), 50% da dose do fertilizante mineral	Puro - 45-50
18	BIOFOM de vinhaça de caldo (45 %ST), 75% da dose do fertilizante mineral	Puro - 45-75
19	BIOFOM de vinhaça de caldo (45 %ST), 100% da dose do fertilizante mineral	Puro - 45-100
20	Adubo mineral equivalente a 100% da dose	Mineral - 100
21	Adubo mineral equivalente a 75% da dose	Mineral - 75
22	Adubo mineral equivalente a 50% da dose	Mineral - 50
23	Vinhaça de melaço+caldo concentrada a 30 %ST + complementação	Comple - Misto
24	Vinhaça de melaço concentrada a 30 %ST + complementação	Comple - Melaço
25	Vinhaça de caldo concentrada a 30 %ST + complementação	Comple - Puro

ST = sólidos totais; Adubação mineral = 500 kg de 4-20-20 (N,P,K) +30 kg de N em cobertura

4.2 Preparo do BIOFOM

Foi confeccionado BIOFOM obedecendo às seguintes proporções: 10,7 (torta de filtro): 9,8 (vinhaça 30 ou 45 ST): 5,0 (aditivos): 3,0 (melaço): 2,4 (cinzas): 1,5 (fuligem):1,7 (uréia) : 1,0 (KCl) (em massa).

A confecção do BIOFOM seguiu a metodologia proposta por GURGEL (2009a). Primeiramente, colocou-se no disco a mistura quantificada de torta de filtro seca + cinzas da caldeira + fuligem da chaminé, aspergindo-se, em seguida, a vinhaça concentrada (30 e 45% de ST), dependendo do tratamento. A aspersão da vinhaça concentrada promove a formação dos grânulos do biofertilizante, pois em volta das gotículas de vinhaça se inicia a formação dos grânulos, que devem ter um diâmetro médio de 5 mm. Juntamente com os subprodutos foram adicionados os três aditivos (polímero, umectante e resina), responsáveis pela estabilidade final dos grânulos. Para esta metodologia esperava-se dureza dos grânulos em torno de 2,0 kgf cm^{-2} e a umidade final do grânulo por volta de 8%, sendo que a umidade retirada no secador, para a armazenagem do produto, variou entre 30 e 40% (GURGEL, 2009ab).

A granulação do biofertilizante foi feita em disco tipo prato, acionado por motor de 3 cv, com rotação de 1710 rpm, no qual foi instalado um redutor, que reduz a rotação do disco para 35 rpm (GURGEL, 2009ab).

Depois de preparado o BIOFOM com caldo puro, melaço e caldo misto foi caraterizado por meio de análises físico-químicas e granulométricas. As análises físico-químicas e granulométricas foram feitas em Duplic/Trip. Quad ? segundo metodologias apresentadas na tabela 11.

Os vasos de fertilizante mineral na dosagem 100 receberam 1,645 g de uréia, 3,252 g de superfosfato triplo e 2,577 g de KCl, os da dosagem 75 receberam 1,234 g de uréia, 2,439 g de superfosfato triplo e 1,933 g de KCl, os da dosagem 50 receberam 0,823 g de uréia, 1,626 g de superfosfato triplo e 1,289g de KCl.

As quantidades de nutrientes presentes no BIOFOM utilizadas nas diferentes doses e nas diferentes fontes e concentrações, bem como as quantidades de nutrientes presentes vinhaça estão descritas na Tabela 12.

Os vasos de BIOFOM na dosagem 100 para as respectivas fontes (misto, melaço e caldo) e concentrações (30 e 45 ST), receberam, respectivamente, 19,498 g, 20,942, 15,180,

19,168, 21,040 e 22,561 g de produto por vaso. Os vasos nas dosagens 75 e 50 receberam as citadas porcentagens das quantidades supramencionadas.

Os vasos de vinhaça mista (T_{23}), de melaço (T_{24}) e de caldo (T_{25}) receberam no total 0,644 g vaso^{-1} de KCl, sendo, para os 2 primeiros casos, 0,277g vaso^{-1} e para o terceiro caso, 0,290 g vaso^{-1} de KCl equivalente na forma de vinhaça. Quanto ao superfosfato triplo (ST), estes Tratamentos receberam, no total, 0,813g/vaso, sendo, 0,019 g vaso^{-1}, 0,024 g vaso^{-1} e 0,051g vaso^{-1} as quantidades equivalentes na forma de vinhaça. O mesmo ocorre para a uréia, cuja dosagem total em T_{23}, T_{24} e T_{25} correspondem a 0,411g vaso^{-1}, porém, deste total, 0,048 g vaso^{-1}, 0,057 g vaso^{-1} e 0,087g vaso^{-1} relacionam-se às quantidades equivalentes em vinhaça.

Tabela 11 - Quantidade de nutrientes (g vaso^{-1}) presentes nos diferentes tratamentos de BIOFOM e vinhaça

			BIOFOM			Vinhaça		
	Tratamentos	Fonte	uréia	ST	KCl	uréia	ST	KCl
1	Testemunha	calcário	-	-	-	-	-	-
2	Misto 30-50	calcário + BIOFOM	0,981	0,538	0,780	-	-	-
3	Misto 30-75	calcário + BIOFOM	1,472	0,807	1,170	-	-	-
4	Misto 30-100	calcário + BIOFOM	1,963	1,077	1,560	-	-	-
5	Misto 45-50	calcário + BIOFOM	0,894	0,544	0,780	-	-	-
6	Misto 45-75	calcário + BIOFOM	1,340	0,816	1,170	-	-	-
7	Misto 45-100	calcário + BIOFOM	1,787	1,088	1,560	-	-	-
8	Melaço 30-50	calcário + BIOFOM	0,432	0,439	0,780	-	-	-
9	Melaço 30-75	calcário + BIOFOM	0,648	0,658	1,170	-	-	-
10	Melaço 30-100	calcário + BIOFOM	0,864	0,878	1,560	-	-	-
11	Melaço 45-50	calcário + BIOFOM	0,709	0,481	0,780	-	-	-
12	Melaço 45-75	calcário + BIOFOM	1,064	0,722	1,170	-	-	-
13	Melaço 45-100	calcário + BIOFOM	1,418	0,963	1,560	-	-	-
14	Puro 30-50	calcário + BIOFOM	0,657	0,496	0,780	-	-	-
15	Puro 30-75	calcário + BIOFOM	0,985	0,744	1,170	-	-	-
16	Puro 30-100	calcário + BIOFOM	1,314	0,993	1,560	-	-	-
17	Puro 45-50	calcário + BIOFOM	0,958	0,630	0,780	-	-	-
18	Puro 45-75	calcário + BIOFOM	1,436	0,945	1,170	-	-	-
19	Puro 45-100	calcário + BIOFOM	1,915	1,260	1,560	-	-	-
20	Mineral 100	calcário + 4-20-20	-	-	-	0,411	0,813	0,644
21	Mineral 75	calcário + 4-20-20	-	-	-	0,308	0,610	0,483
22	Mineral 50	calcário + 4-20-20	-	-	-	0,206	0,407	0,322
23	Compl. Misto	calcário+vinhaça+compl.*	-	-	-	0,411	0,813	0,644
24	Compl. Melaço	calcário+vinhaça+compl.*	-	-	-	0,411	0,813	0,644
25	Compl. Puro	calcário+vinhaça+compl.*	-	-	-	0,411	0,813	0,644

*complementação mineral

A terra utilizada no experimento foi retirada dos 25 cm superficiais de um Argissolo Vermelho-Amarelo textura média (superior a 25% de argila no horizonte B), com as características químicas, conforme a análise de solo feita no Laboratório de Solos da ESALQ.

Os resultados da análise de terra usada no experimento foram utilizados no cálculo da quantidade de calcário adicionado ao solo para corrigi-lo. Para que o efeito do calcário fosse rápido, o mesmo foi adicionado ao solo dos vasos, que foram molhados logo em seguida e mantidos em capacidade de campo durante sete dias. A análise da terra utilizada no experimento, antes e depois da calagem, está ilustrada na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise da terra utilizada no experimento, antes e após a calagem

Características químicas	Unidade	Valores antes da calagem	Valores após a calagem
pH $CaCl_2$	-	3,7	6,2
M.O	g dm^{-3}	17	13
P	mg dm^{-3}	4	6
S	mg dm^{-3}	13	35
K	$mmol_c$ dm^{-3}	1,0	0,4
Ca	$mmol_c$ dm^{-3}	4	19
Mg	$mmol_c$ dm^{-3}	2	19
Al	$mmol_c$ dm^{-3}	10	0
H+Al	$mmol_c$ dm^{-3}	38	10
SB	$mmol_c$ dm^{-3}	7,0	38,4
T	$mmol_c$ dm^{-3}	45	48,4
V	%	16	79
m	%	59	0
B	mg dm^{-3}	0,2	0,21
Cu	mg dm^{-3}	1,1	0,9
Fe	mg dm^{-3}	57	9
Mn	mg dm^{-3}	74,3	7,9
Zn	mg dm^{-3}	1,9	1,0

Teores de areia, silte e argila antes da calagem, respectivamente, 82%, 6% e 12%

4.3 Preparação dos vasos

Cada parcela foi representada por um vaso com 2,5 L de capacidade, no qual foram adicionados 2 kg de terra (com massa específica de, aproximadamente, 1,3 kg L^{-1}) 0,625 g de $CaCO_3$ e 0,625 g de MgO e foram semeadas duas sementes de milho por vaso, variedade DOW 2B-710. Os grânulos de BIOFOM e de adubo foram homogeneizados no solo (da metade inferior do vaso), tendo sido completados com terra na metade superior. O processo de preparo dos vasos está ilustrado na Figura 31.

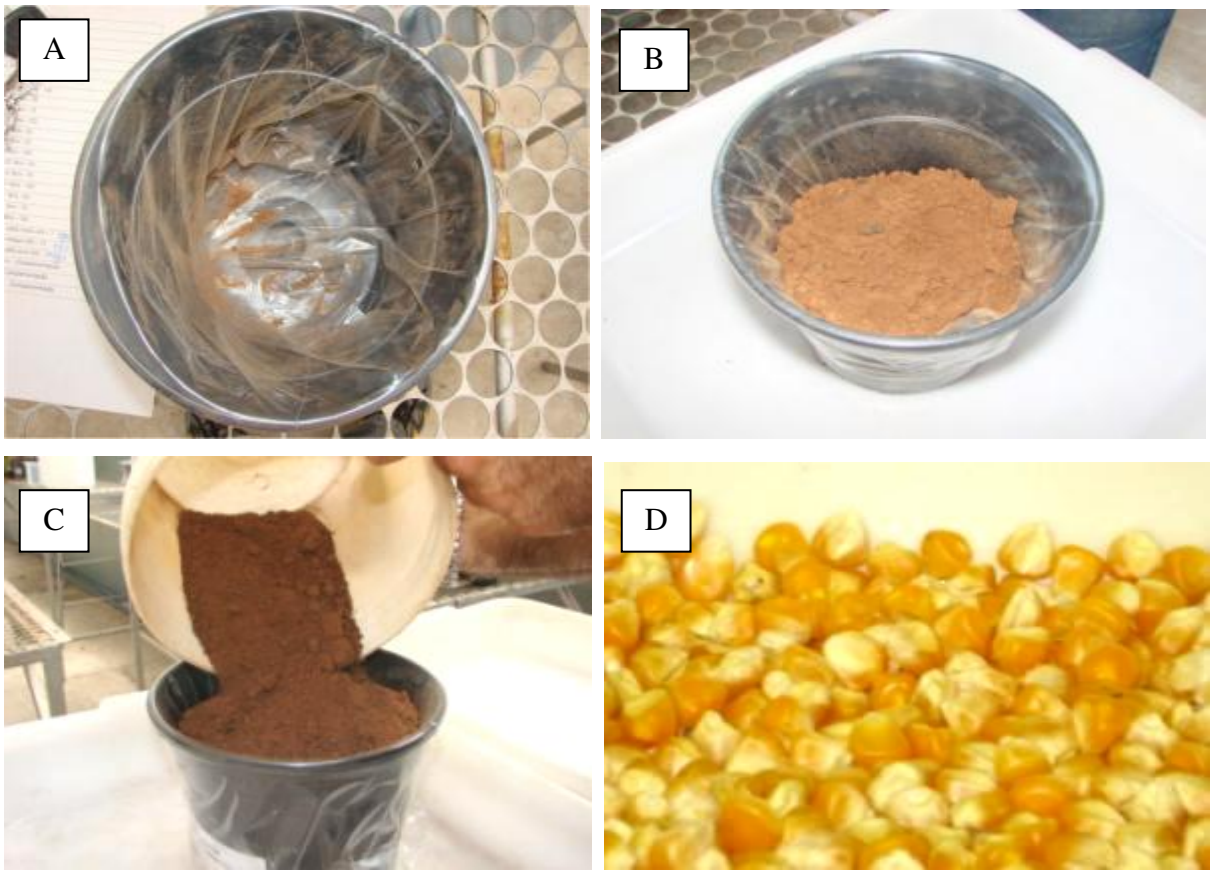

Figura 31 - Preparo dos vasos com 2,5 L de capacidade semeados com 2 sementes de milho cada. A) Vaso com saco plástico para evitar perdas de água e nutrientes por lixiviação. Volume 2,5 L=2 kg solo; B) Grânulos de BIOFOM e Adubo sendo homogeneizados no solo (da metade inferior do vaso); C) Preenchimento do restante do vaso com solo (metade superior do vaso); D) Semente de milho utilizada no experimento – DOW 2B710

Fonte: Fotos do Autor, 2008

4.4 Análise do Potencial Agronômico

O Potencial Agronômico foi avaliado com relação à área foliar, matéria seca das porções aérea e raízes, quantidade de nutrientes em porções aérea da planta e raízes, e BIOFOM remanescentes após a colheita.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização e potencial agronômico do BIOFOM

Com relação ao adubo químico, o BIOFOM formulado apresenta granulometria semelhante; custo compartilhado por outros processos, como produção de açúcar, etanol e eletricidade. Se comparado à vinhaça *in natura*, o BIOFOM não apresenta odor e, devido à sua composição orgânica, tem aplicação facilitada e não sofre lixiviação no solo.

As Tabelas 13 e 14 apresentam as análises físico-químicas e granulométricas dos biofertilizantes organominerais (BIOFOM) utilizados no experimento, na umidade natural.

Tabela 13 - Análise físico-química dos biofertilizantes organominerais (BIOFOM) utilizados

Determinações	Caldo puro		Melaço		Caldo misto	
	30	45	30	45	30	45
pH em $CaCl_2$ 0,01 M	6,2	5,8	6,5	6,5	6,7	6,5
Densidade (g cm^{-2})	0,52	0,58	0,50	0,52	0,54	0,57
Umidade perdida a 60-65 °C (%)	4,20	3,89	3,66	3,45	3,30	3,92
Umidade perdida entre 65 e 110 °C (%)	4,22	3,84	4,29	4,22	5,81	4,6
Umidade total (%)	8,42	7,73	7,95	7,76	9,01	8,52
Matéria orgânica total (combustão) (%)	46,84	43,9	46,4	43,72	44,83	39,8
Matéria orgânica compostável (%)	45,44	41,45	41,55	41,6	41,73	36,25
Matéria orgânica resistente a compostagem (%)	1,4	2,45	4,85	2,12	3,10	3,55
Carbono total (orgânico e mineral) (%)	26,02	24,39	25,78	24,29	24,91	22,11
Carbono orgânico (%)	25,24	23,03	23,08	21,11	23,19	20,14
Resíduo mineral total (%)	44,73	48,37	45,65	48,52	46,16	51,68
Resíduo mineral insolúvel (%)	28,55	33,74	23,56	29,84	28,77	35,83
Resíduo mineral solúvel (%)	16,18	14,63	22,09	18,68	17,39	15,85
Nitrogênio total (%)	2,81	3,82	2,56	3,33	4,53	3,84
Fósforo (P_2O_5) total (%)	2,17	2,57	2,66	2,31	2,54	2,39
Potássio (K_2O) total (%)	4,30	4,01	5,96	4,72	4,64	4,32
Cálcio (Ca) total (%)	2,17	2,50	2,81	2,56	2,45	2,42
Magnésio (Mg) total (%)	0,51	0,53	0,6	0,59	0,51	0,48
Enxofre (S) total (%)	0,28	0,28	0,4	0,58	0,31	0,27
Relação C/N (C total e N total)	9/1	16/1	10/1	7/1	5/1	6/1
Relação C/N (C orgânico e N total)	9/1	15/1	9/1	7/1	5/1	5/1
Cobre (Cu) total (mg kg^{-1})	36	41	38	39	51	36
Manganês (Mn) total (mg kg^{-1})	1013	1226	1322	1122	1154	11,39

Zinco (Zn) total (mg kg^{-1})	167	213	224	183	208	197
Ferro (Fe) total (mg Kg^{-1})	11665	13865	12022	11845	11738	12898
Boro (B) total (mg kg^{-1})	2	2	2	2	2	2
Sódio (Na) total (mg kg^{-1})	1769	1343	2693	2408	1681	1486
Dureza (kgf cm^{-2})	1,28	1,19	0,96	1,43	1,54	1,44

Tabela 14 - Análise granulométrica dos biofertilizantes organominerais (BIOFOM) utilizados

Granulometria (cm)	< 0,50	>0,50	>0,84	>2,00	>4,00	>4,76	>9,51	Total(%)
Caldo 30	3,98	2,9	6,15	20,50	8,96	49,22	8,30	100
Caldo 45	14,25	8,58	15,06	24,99	7,22	27,19	2,72	100
Vinhaça de melaço 30	10,03	8,40	22,62	35,20	7,22	14,68	1,84	100
Vinhaça de melaço 45	11,07	6,67	20,33	25,86	7,06	24,44	4,57	100
Melaço + caldo 30	16,18	12,96	10,40	10,92	4,84	32,91	11,79	100
Melaço + caldo 45	14,97	22,79	14,12	14,12	5,45	30,45	9,10	100

A Figura 32 mostra as plantas de milho emergindo (5 dias após a emergência - DAE), com detalhe para o enraizamento vigoroso.

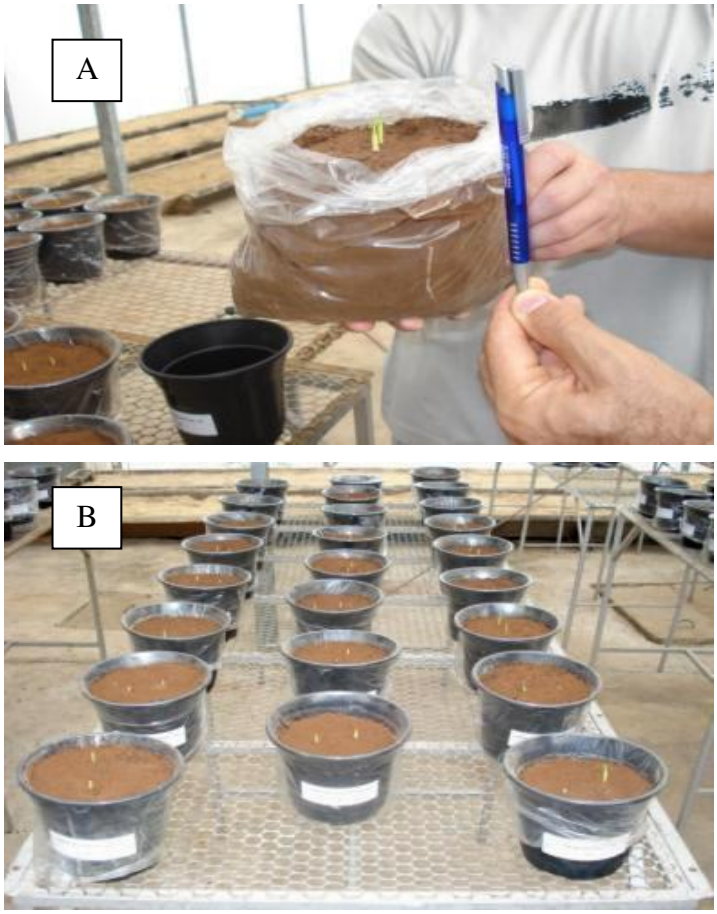

Figura 32 - (A) Detalhe de plantas de milho 5 dias após a emergência (DAE) e enraizamento; (B) Plantas de milho no 5 DAE.

Fonte: Fotos do Autor, 2008

Na Figura 33 são mostradas as plantas de milho na fase de desbaste, 8 dias após a emergência.

Figura 33 - Plantas de milho 8 após a emergência (DAE) – desbaste

Fonte: Foto do Autor, 2008

O andamento do experimento nos períodos de 12, 20 e 50 DAE, respectivamente, está ilustrado nas Figuras 34, 35 e 36.

Figura 34 - Plantas de milho 12 dias após a emergência (DAE)

Fonte: Foto do Autor, 2008

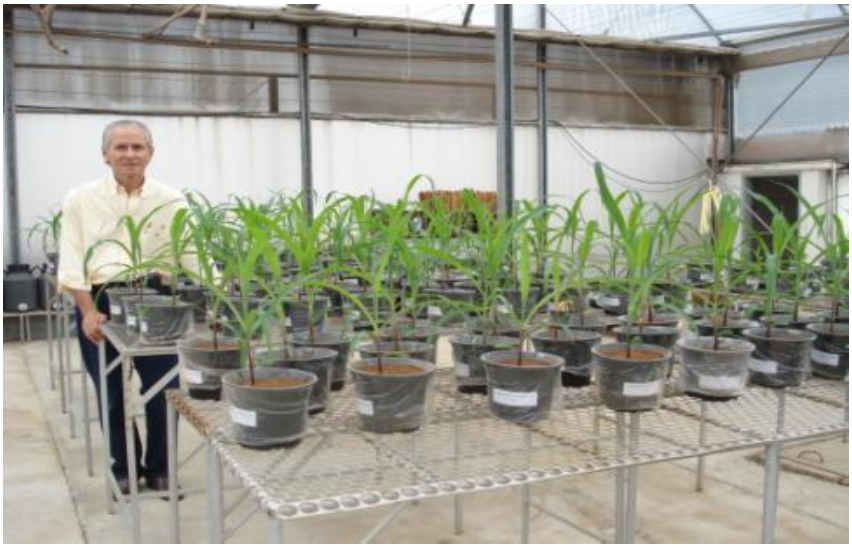

Figura 35 - Plantas de milho 20 dias após a emergência (DAE)

Fonte: Foto do Autor, 2008

Figura 36 - Plantas de milho 50 dias após a emergência (DAE)

Fonte: Foto do Autor, 2008

Nos itens que se seguem são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos para área foliar, massa do material seco da parte aérea das plantas, acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas, massa do material seco das raízes e análise de terra dos vasos do experimento.

5.1.1 Área foliar e massa do material seco da parte aérea das plantas

Para o parâmetro área foliar, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 12,47% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 879,16 cm^2 por planta. Para a massa do material seco da parte aérea, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 7,97% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 5,81 g por planta, conforme mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Área foliar (AF) e massa de material seco da parte aérea das plantas de milho (MMSpa) e respectivos testes de *Tukey*

	Tratamentos	AF (cm^2 / $planta^{-1}$)	MMSpa ($g.planta^{-1}$)
1	Testemunha	546,1 F	3,27 H
2	Misto - 30-50	2781,6 CDE	14,523 BCDEF
3	Misto - 30-75	2498,8 CDE	9,918 FG
4	Misto - 30-100	2113,6 DE	5,755 GH
5	Misto - 45-50	2759 CDE	13,313 DEF
6	Misto - 45-75	2752,5 CDE	12,115 EF
7	Misto - 45-100	2361,1 DE	9,545 FG
8	Melaço - 30-50	1961,9 E	15,348 ABCDEF
9	Melaço - 30-75	2293 DE	15,833 ABCDE
10	Melaço - 30-100	2653,7 CDE	15,918 ABCDE
11	Melaço - 45-50	2767,3 CDE	13,89 CDEF
12	Melaço - 45-75	2675,2 CDE	13,77 CDEF
13	Melaço - 45-100	2902,5 BCD	13,255 DEF
14	Puro - 30-50	2098,8 DE	14,355 BCDEF
15	Puro - 30-75	2490,3 CDE	15,295 ABCDEF
16	Puro - 30-100	2848,8 CD	15,145 ABCDEF
17	Puro - 45-50	2450,7 DE	15,320 ABCDEF
18	Puro - 45-75	2701,8 CDE	16,095 ABCDE
19	Puro - 45-100	2870,1 CD	14,943 ABCDEF
20	Mineral - 100	3771 AB	20,42 A
21	Mineral - 75	3891,3 A	19,513 ABC
22	Mineral - 50	3361,5 ABC	17,68 ABCDE
23	Comple - Misto	2812,4 CDE	19,79 AB
24	Comple - Melaço	2527,8 CDE	18,715 ABCD
25	Comple - Puro	2616,3 CDE	18,36 ABCD

Para descrição detalhada dos tratamentos, vide Tabela 9. Letras iguais indicam que as médias não diferem significativamente ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

Na Tabela 14 estão apresentados os resultados do experimento para a área foliar das plantas de milho e para a massa do material seco da parte aérea dessas plantas, para os 25 tratamentos, mostrando o valor médio das quatro repetições.

Para a área foliar (AF), as três dosagens do fertilizante mineral (tratamentos 20, 21 e 22) não apresentaram diferenças significativas entre si, sendo que os tratamentos 20 e 22 não apresentaram diferenças significativas do BIOFOM de vinhaça de melaço 45 na dose 100 (tratamento 13). A dose 50 do fertilizante mineral (tratamento 22) não apresentou diferenças significativas das doses 50 e 75 do BIOFOM de vinhaça mista 30 e 45 (tratamentos 2, 3,5 e 6), da dose 100 do BIOFOM de melaço 30 (tratamento 10) e das 3 doses do BIOFOM de melaço 45 (tratamentos 11, 12 e 13), das doses 75 e 100 do BIOFOM de vinhaça de caldo 30 e 45 (tratamentos 15, 16, 18 e 19) e das três vinhaças concentradas a 30% de sólidos totais, com a complementação mineral correspondente a dose 100 do fertilizante mineral (tratamentos 23, 24 e 25). Para este parâmetro (AF), a Testemunha diferiu significativamente de todos os demais tratamentos.

Se comparado ao melhor tratamento do fertilizante mineral (20), podemos entender como satisfatórios os desempenhos dos BIOFOMs provenientes de vinhaça de melaço concentrado a 30% de Sólidos Totais em qualquer dosagem, assim como os BIOFOMs provenientes de vinhaça de caldo puro, concentrado a 30% ou 45% de Sólidos Totais, excetuando-se o tratamento 14, concentrado a 30% ST, que tem dosagem 50% da dose do fertilizante mineral.

O fato dos tratamentos com a aplicação do fertilizante mineral ter promovido uma área foliar maior mostra que parte dos nutrientes presentes no BIOFOM não estava disponível até 45 dias após sua aplicação, o que é uma vantagem quando se trabalha em um sistema aberto, onde ocorre lixiviação dos nutrientes móveis no solo. No experimento, por se tratar de sistema fechado, essa perda não ocorreu, levando os tratamentos onde se fez a adubação com fertilizantes minerais a apresentarem eficiência um pouco maior, o que certamente não ocorrerá no campo.

Para a massa do material seco da parte aérea das plantas de milho, as três dosagens do fertilizante mineral (20, 21 e 22) não apresentaram diferenças significativas entre si e com as três doses do BIOFOM de vinhaça de caldo 30 e 45 (tratamentos 14 a 19), as três doses do

BIOFOM de vinhaça de melaço 30 (tratamentos 8, 9 e 10) e os tratamentos 23, 24 e 25. A Testemunha também diferiu significativamente de todos os demais tratamentos.

Assim como na análise da área foliar, o fato dos tratamentos com a aplicação do fertilizante mineral ter promovido massa de material seco maior da parte aérea mostra que, parte dos nutrientes presentes no BIOFOM estava indisponível até 45 dias após sua aplicação e que, no experimento (sistema fechado), essa perda não ocorreu, levando os tratamentos onde se fez a adubação com fertilizantes minerais a apresentarem eficiência um pouco maior.

A Figura 37 mostra um comparativo entre a testemunha e o tratamento com BIOFOM, no início e final do experimento.

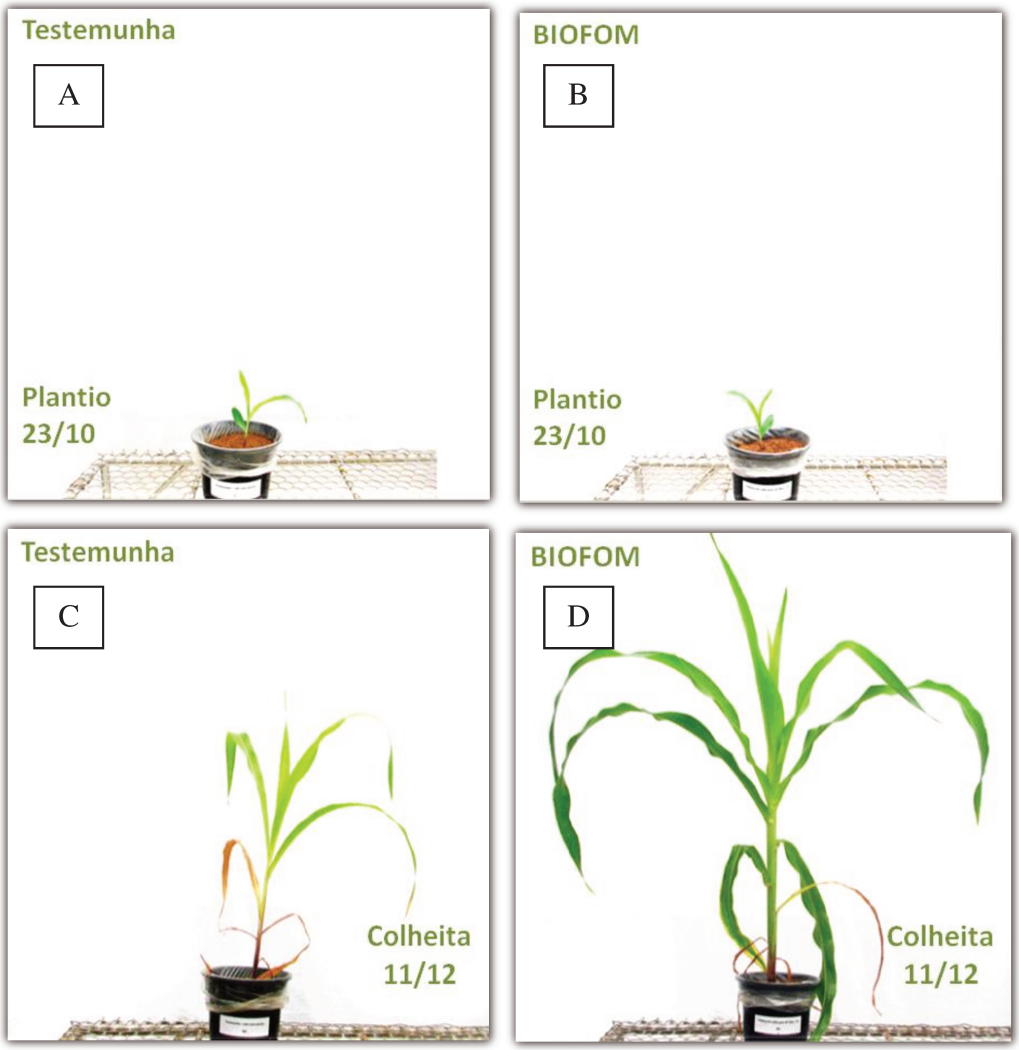

Figura 37 - Evolução no desenvolvimento das plantas de milho (plantio – A e C e colheita – B e D) – testemunha e tratamento com BIOFOM

Fonte: Fotos do Autor, 2008

A Figura 38 mostra um exemplo de tratamento com BIOFOM e outro com fertilizante mineral, quando comparados à testemunha. Destaca-se a similaridade na resposta visual entre o tratamento com BIOFOM e o tratamento mineral.

Figura 38 - Comparativo entre o desenvolvimento de plantas de milho submetidas a diferentes tratamentos: Testemunha, BIOFOM e Mineral

Fonte: Fotos do Autor, 2008

5.1.2 Acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas

Os itens a seguir apresentam os resultados do acúmulo dos principais nutrientes na parte aérea das plantas de milho, elucidando os 25 tratamentos, mostrando a média das quatro repetições, conforme mostrado na Tabela 16.

Tabela 16 - Acúmulo de macronutrientes (mg planta^{-1}) na parte aérea das plantas de milho e respectivos testes de *Tukey*

	Tratamentos	Macronutrientes e teste de *Tukey*					
		N	P	K	Ca	Mg	S
1	Testemunha	35,44 D	2,82 I	33,56 D	12,61 E	25,57 E	2,96 D
2	Misto - 30-50	195,68 C	20,54 DEFGH	357,83 BC	44,55 BCD	65,15 AB	15,71 BC
3	Misto - 30-75	226,12 C	24,79 CDEFGH	369,62 BC	35,98 CDE	38,18 BCDE	14,30 BC
4	Misto - 30-100	161,47 CD	11,91 HI	236,12 CD	22,19 DE	28,34 DE	11,17 CD
5	Misto - 45-50	214,73 C	18,63 EFGHI	365,16 BC	45,00 BCD	57,03 ABC	14,94 BC
6	Misto - 45-75	236,80 C	23,98 CDEFGH	424,17 ABC	36,25 CDE	46,58 ABCDE	15,75 BC
7	Misto - 45-100	222,01 C	23,37 CDEFGH	362,87 BC	31,22 CDE	31,87 CDE	14,84 BC
8	Melaço - 30-50	158,96 CD	18,00 EFGHI	348,11 BC	42,15 BCD	45,28 ABCDE	10,30 CD
9	Melaço - 30-75	190,44 C	24,82 CDEFGH	540,78 AB	55,06 ABC	51,17 ABCDE	12,52 BCD
10	Melaço - 30-100	213,21 C	25,98 CDEFGH	608,35 AB	55,03 ABC	51,27 ABCDE	16,95 ABC
11	Melaço - 45-50	190,52 C	18,21 EFGHI	366,50 BC	47,34 BC	46,50 ABCDE	12,13 CD
12	Melaço - 45-75	197,61 C	23,02 CDEFGH	531,62 ABC	49,72 ABC	49,77 ABCDE	15,14 BC
13	Melaço - 45-100	231,01 C	27,18 CDEFGH	418,67 ABC	51,42 ABC	42,74 ABCDE	16,91 ABC
14	Puro - 30-50	131,86 CD	15,02 GHI	314,73 BCD	38,61 BCD	49,04 ABCDE	9,23 CD
15	Puro - 30-75	167,44 CD	19,69 DEFGH	432,04 ABC	39,68 BCD	51,90 ABCDE	12,39 BCD
16	Puro - 30-100	223,77 C	24,12 CDEFGH	378,33 BC	43,18 BCD	43,58 ABCDE	15,49 BC
17	Puro - 45-50	193,29 C	17,01 FGHI	350,47 BC	36,09 CDE	55,28 ABCD	12,62 BCD
18	Puro - 45-75	231,84 C	23,67 CDEFGH	448,34 ABC	38,10 BCD	58,36 ABC	13,80 BC
19	Puro - 45-100	255,18 BC	29,24 CDEFG	468,91 ABC	41,07 BCD	51,69 ABCDE	17,24 ABC
20	Mineral - 100	490,73 A	71,43 A	702,79 A	73,20 A	60,66 AB	26,06 A
21	Mineral - 75	369,68 AB	51,91 B	613,54 AB	60,44 AB	61,77 AB	22,38 AB
22	Mineral - 50	245,05 BC	35,17 CD	396,95 BC	47,13 BC	70,22 A	14,38 BC
23	Comple - Misto	226,06 C	38,20 BC	503,61 ABC	46,50 BC	55,54 ABCD	17,69 ABC
24	Comple - Melaço	184,84 C	33,23 CDE	457,79 ABC	38,91 BCD	55,12 ABCD	13,87 BC
25	Comple - Puro	185,88 C	31,33 CDEF	442,25 ABC	48,73 BC	59,94 ABC	14,26 BC

Para descrição detalhada dos tratamentos, vide Tabela 9. Letras iguais indicam que as médias não diferem significativamente ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

5.1.2.1 Macronutrientes

Nitrogênio (N)

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 22,82% maior que para área foliar, pois acumulam as variações das concentrações de N e do material seco, e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 132,08 mg por planta.

A dosagem 100 do fertilizante mineral (tratamento 20) não apresentou diferença significativa da dose 75 (tratamento 21) e esta, da dose 50 (tratamento 22) e da dose 100 do BIOFOM de vinhaça de caldo 45 (tratamento 19). Todos os demais tratamentos de BIOFOM e das vinhaças concentradas e complementadas não diferiram significativamente do tratamento 22. A Testemunha diferiu significativamente de todos os demais tratamentos.

Fósforo (P)

Os resultados para este nutriente apresentaram coeficiente de variação (CV) de 22,58%, também maior que para área foliar pela mesma razão apresentada para o N, e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 15,87 mg por planta.

A dosagem 100 do fertilizante mineral (tratamento 20) apresentou diferença significativa da dose 75 (tratamento 21) e esta, por sua vez, não diferiu significativamente da vinhaça de melaço + caldo, complementada com fertilizante mineral (tratamento 23). Todos os tratamentos de BIOFOM e as demais vinhaças complementadas não diferiram significativamente da dose 50 do fertilizante mineral (tratamento 22), exceto os tratamentos de BIOFOM de vinhaça de caldo e de vinhaça de melaço 30 e 45 na dose 50 (tratamentos 8,11,14 e 17), o de vinhaça melaço + caldo 30 na dose 100 (tratamento 4) e o de vinhaça melaço + caldo 45 na dose 50 (tratamento 5), que não diferiram significativamente da Testemunha.

O fato dos tratamentos com a aplicação das doses 100 e 75 do fertilizante mineral (tratamentos 20 e 21) terem promovido acúmulo de fósforo maior na parte aérea mostra que parte do fósforo o presente no BIOFOM não estava disponível até 45 dias após sua aplicação.

Potássio (K)

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 26,82%, também maior que para área foliar pela mesma razão reportada nos casos do N e P, e

uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 302,22 mg por planta.

A dosagem 100 do fertilizante mineral (tratamento 20) não apresentou diferença significativa da dose 75 (tratamento 21), das três vinhaças concentradas e complementadas (tratamentos 23, 24 e 25) e dos BIOFOM de vinhaça de caldo 45, nas doses 75 e 100 (tratamentos 18 e 19), do BIOFOM de vinhaça de caldo 30 na dose 75 (tratamento 15), do BIOFOM de vinhaça de melaço 30 e 45, nas doses 75 e 100 (tratamentos 9,10,12 e 13), e do BIOFOM de vinhaça mista 45, na dose 75 (tratamento 6). A Testemunha diferiu de praticamente todos os tratamentos, com exceção do 4 e do 14.

Cálcio (Ca)

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 22,75%, também maior que para área foliar, pois acumulam as variações das concentrações de Ca e do material seco, e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 24,12 mg por planta.

A dosagem 100 do fertilizante mineral (tratamento 20) não apresentou diferença significativa da dose 75 (tratamento 21) e dos BIOFOM de vinhaça de melaço 30 e 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 9,10,12 e 13). A dosagem 75 do fertilizante mineral (tratamento 21) apresentou diferença significativa dos BIOFOM de vinhaça de caldo 30 na dose 50 (tratamento 14), dos BIOFOM de vinhaça mista 30 e 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 3,4,6 e 7) e do BIOFOM de vinhaça de caldo 45 na dose 50 (tratamento 17). A Testemunha somente não diferiu dos tratamentos 3, 4,6,7 e 17.

O fato dos tratamentos com a aplicação do fertilizante mineral nas doses 100 e 75 ter promovido acúmulo de cálcio maior na parte aérea é função da maior disponibilidade para a planta de N, P e K nos primeiros 45 dias, o que não ocorreu na mesma magnitude com as plantas que receberam vinhaça complementada e BIOFOM.

Magnésio (Mg)

Para o Mg, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 20,86%, também maior que para área foliar, pois acumulam as variações das concentrações de Mg e do material seco, e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 28,12 mg por planta.

As três dosagens do fertilizante mineral (tratamentos 20, 21 e 22) não apresentaram diferença significativa entre si e entre os tratamentos com BIOFOM, exceto o de vinhaça mista 30 na dosagem 100 (tratamento 4), e o de vinhaça mista 45 na dosagem 100 (tratamento 7). A Testemunha diferiu significativamente das três vinhaças complementadas (tratamentos 23 a 25), das três dosagens do fertilizante mineral, dos BIOFOM de vinhaça de caldo 45 nas dosagens 50 e 75 (tratamentos 17 e 18) e dos BIOFOM de vinhaça mista 30 e 45 na dosagem 50 (tratamentos 2 e 5).

Enxofre (S)

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 25,64%, também maior que para área foliar, pois acumulam as variações das concentrações de S e do material seco, e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 10,02 mg por planta.

As dosagens 100 e 75 do fertilizante mineral (tratamentos 20 e 21) não apresentaram diferença significativa entre si e com a vinhaça mista complementada (tratamento 23), com os BIOFOM de vinhaça de caldo 45 na dosagem 100 (tratamento 19) e com os BIOFOM de vinhaça de melaço 45 e 30 na dosagem 100 (tratamentos 10 e 13). A dosagem 75 do fertilizante mineral (tratamento 21) apresentou diferença significativa da Testemunha e dos BIOFOM de vinhaça de caldo 30 na dosagem 50 (tratamento 14), de vinhaça de melaço 45 e 30 na dosagem 50 (tratamentos 8 e 11) e de vinhaça mista 30 na dosagem 100 (tratamento 4).

A Testemunha diferiu significativamente das três vinhaças complementadas (tratamentos 23 a 25), das três dosagens do fertilizante mineral (tratamentos 20 a 22), dos BIOFOM de vinhaça de caldo e de vinhaça de melaço 45 nas dosagens 100 e 75 (tratamentos 12,13,18 e 19), dos BIOFOM de vinhaça de melaço e de caldo 30 na dosagem 100 (tratamentos 10 e 16), dos BIOFOM de vinhaça mista 45 nas três dosagens (tratamentos 5 a 7) e dos BIOFOM de vinhaça melaço+caldo 30 nas dosagens 75 e 50 (tratamentos 2 e 3).

5.1.2.2 Micronutrientes

A Tabela 17 apresenta os resultados do experimento referente ao acúmulo dos principais micronutrientes na parte aérea das plantas de milho, elucidando os 25 tratamentos, mostrando a média das quatro repetições.

Tabela 17 - Acúmulo de micronutrientes (μg planta^{-1}) na parte aérea das plantas de milho e respectivos testes de *Tukey*

Tratamentos		Micronutrientes				
		B	Cu	Fe	Mn	Zn
1	Testemunha	77,15 B	18,87 D	402,14 E	937,57 F	111,48 E
2	Misto - 30-50	306,94 AB	100,14 ABC	1373,92 ABCDE	9824,32 CDE	539,36 ABCD
3	Misto - 30-75	275,90 AB	87,51 BCD	1151,89 BCDE	8199,16 CDEF	408,88 CD
4	Misto - 30-100	166,46 AB	47,25 CD	787,82 DE	5455,51 EF	247,99 DE
5	Misto - 45-50	350,54 AB	83,22 BCD	1408,22 ABCD	9135,06 CDE	524,21 ABCD
6	Misto - 45-75	377,47 AB	94,32 ABC	1353,43 ABCDE	8104,59 CDEF	447,78 BCD
7	Misto - 45-100	332,81 AB	78,21 CD	940,30 CDE	6879,79 EF	349,25 CDE
8	Melaço - 30-50	156,84 AB	75,81 CD	1670,96 ABCD	9345,58 CDE	480,45 ABCD
9	Melaço - 30-75	353,74 AB	87,22 BCD	1645,13 ABCD	6532,62 EF	447,14 BCD
10	Melaço - 30-100	404,43 AB	112,30 ABC	1719,73 ABCD	7410,00 DEF	453,77 BCD
11	Melaço - 45-50	266,01 AB	73,95 CD	1419,51 ABCD	5427,56 EF	525,57 ABCD
12	Melaço - 45-75	375,91 AB	89,78 ABCD	1705,98 ABCD	7681,92 DEF	520,17 ABCD
13	Melaço - 45-100	222,42 AB	95,02 ABC	1463,14 ABCD	9070,85 CDE	542,96 ABCD
14	Puro - 30-50	481,48 AB	71,66 CD	1567,92 ABCD	6635,32 EF	381,28 CDE
15	Puro - 30-75	305,24 AB	77,13 CD	1427,05 ABCD	7774,58 DEF	450,96 BCD
16	Puro - 30-100	383,57 AB	110,75 ABC	1579,58 ABCD	9525,57 CDE	455,36 BCD
17	Puro - 45-50	214,13 AB	80,89 BCD	1459,13 ABCD	8904,68 CDE	422,29 BCD
18	Puro - 45-75	467,17 AB	82,80 BCD	1383,64 ABCDE	10259,91 CDE	453,20 BCD
19	Puro - 45-100	223,48 AB	109,58 ABC	1240,20 ABCDE	9442,37 CDE	498,91 ABCD
20	Mineral - 100	511,12 AB	159,47 A	2230,22 A	17813,58 AB	775,77 A
21	Mineral - 75	379,33 AB	151,14 AB	2104,15 AB	20910,64 A	710,36 AB
22	Mineral - 50	473,87 AB	106,31 ABC	1846,04 ABC	15425,94 ABC	579,78 ABC
23	Comple - Misto	447,70 AB	112,22 ABC	1905,89 ABC	14689,61 ABCD	558,89 ABC
24	Comple - Melaço	456,87 AB	91,57 ABC	1615,97 ABCD	12105,27 CDE	505,65 ABCD
25	Comple - Puro	539,51 A	112,23 ABC	1509,33 ABCD	9363,25 CDE	506,33 ABCD

Para descrição detalhada dos tratamentos, vide Tabela 9. Letras iguais indicam que as médias não diferem significativamente ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

Boro (B)

Para este micronutriente os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 48,10%, acumulando as variações das concentrações de B e do material seco, e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 442,54 μg por planta.

A Testemunha diferiu significativamente apenas da vinhaça de caldo complementada (tratamento 25), sendo que todos os demais tratamentos não diferiram entre si devido ao alto coeficiente de variação (CV) das concentrações de B na parte aérea das plantas de milho e pelo elevado valor da diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey).

Cobre (Cu)

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 28,82%, também maior que para área foliar, pois acumulam as variações das concentrações de Cu e do material seco e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 71,61 μg por planta.

As três dosagens do fertilizante mineral (tratamentos 20 a 22) não apresentaram diferença significativa entre si e nem entre as três vinhaças complementadas (tratamentos 23 a 25), BIOFOM de vinhaça de caldo 30 e 45 na dosagem 100 (tratamentos 16 e 19), de vinhaça de melaço 45 nas dosagens 75 e 100 (tratamentos 12 e 13), de vinhaça de melaço 30 na dosagem 100 (tratamento 10), de vinhaça mista 45 na dosagem 75 (tratamento 6) e de vinhaça mista 30 na dosagem 50 (tratamento 2).

A Testemunha diferiu significativamente das três vinhaças complementadas (tratamentos 23 a 25), das três dosagens do fertilizante mineral, dos BIOFOM de vinhaça de caldo 30 e 45 na dosagem 100 (tratamentos 16 e 19), dos BIOFOM de vinhaça de melaço 30 e 45 na dosagem 100 (tratamentos 10 e 13), dos BIOFOM de vinhaça mista 45 na dosagem 75 (tratamento 6) e de vinhaça mista 30 na dosagem 50 (tratamento 2).

Ferro (Fe)

Para este nutriente, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 25,04%, também maior que para área foliar, pois acumula as variações das concentrações de Fe e do material seco, e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 994,44 μg por planta.

As três dosagens do fertilizante mineral não apresentaram diferença significativa entre si (tratamentos 20 a 22). O tratamento 21 diferiu apenas do tratamento de BIOFOM de vinhaça melaço+caldo 30 na dosagem100 (tratamento 4), do tratamento BIOFOM de vinhaça melaço+caldo 45 na dosagem 100 (tratamento 7) e da Testemunha. A Testemunha não diferiu dos tratamentos 2,3,4,6,7,18 e 19.

Manganês (Mn)

No caso do Mn, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 29,31%, também maior que para área foliar, pois acumula as variações das concentrações de Mn e do material seco, e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 7470 μg por planta.

As três dosagens do fertilizante mineral não apresentaram diferença significativa entre si e com a vinhaça mista complementada (tratamento 23). A dosagem 50 do fertilizante mineral (tratamento 22) apresentou diferença significativa em relação ao BIOFOM de vinhaça de caldo 30 nas dosagens 50 e 75 (tratamentos 14 e 15), BIOFOM de vinhaça de melaço 45 nas dosagens 50 e75 (tratamentos 11 e 12) e de melaço 30 nas dosagens 75 e 100 (tratamentos 9 e 10), de vinhaça mista 30 e 45 na dosagem 100 (tratamentos 4 e 7) e a Testemunha. Esta, por sua vez, não diferiu significativamente, além dos que diferiram da dosagem 50 do fertilizante mineral, dos BIOFOM de vinhaça mista 30 e 45 na dosagem 75 (tratamentos 3 e 6).

Zinco (Zn)

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 23,07%, também maior que para área foliar, pois acumula as variações das concentrações de Zn e do material seco, e uma diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 295,34 μg por planta.

As três dosagens do fertilizante mineral (tratamentos 20 a 22) não apresentaram diferença significativa entre si e nem com as três vinhaças complementadas (tratamentos 23 a 25), BIOFOM de vinhaça de caldo 45 na dosagem 100 (tratamento 19), BIOFOM de vinhaça de melaço 45 nas três dosagens (tratamentos 11 a 13), BIOFOM de vinhaça de melaço 30 na dosagem 50 (tratamento 8), de vinhaça mista 30 e 45 na dosagem 50 (tratamentos 2 e 5).

A Testemunha não diferiu significativamente do BIOFOM de vinhaça de caldo 30 na dosagem 50 (tratamento 14), de vinhaça mista 30 e 45 na dosagem 100 (tratamentos 4 e 7).

De maneira geral, observou-se que os tratamentos 20 e 21, com a aplicação das doses 100 e 75 do fertilizante mineral, promoveram acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio maior na parte aérea mostrando que, parte destes nutrientes presentes no BIOFOM não estava disponível até 45 dias após sua aplicação - o que é uma vantagem quando se trabalha em um sistema aberto onde ocorre lixiviação dos nutrientes móveis no solo. No experimento, por se tratar de sistema fechado, essa perda não ocorreu, levando os tratamentos onde se fez a adubação com fertilizantes minerais a apresentarem eficiência um pouco maior, o que não deverá ocorrer a campo.

Ressalta-se que estes mesmos tratamentos (100 e 75 do fertilizante mineral) também promoveram acúmulo maior de cálcio na parte aérea, função da maior disponibilidade de N, P e K nos primeiros 45 dias, fazendo com que as plantas crescessem mais, acumulando mais cálcio que nos tratamentos que receberam vinhaça complementada e BIOFOM.

Para a cana de açúcar, cujo ciclo é de 12 a 18 meses, tempo suficiente para que o restante do N, P, K do BIOFOM se disponibilize e, em um sistema aberto, pode-se esperar que o comportamento do BIOFOM seja semelhante, ou até mesmo melhor, que os dos tratamentos com fertilizante mineral.

O fato da maioria dos tratamentos ter promovido acúmulo de Mg, S, B, Cu, Fe, Mn semelhante na parte aérea, exceto a Testemunha e alguns BIOFOM, deve-se ao fornecimento desses nutrientes em dosagens semelhantes para todos os tratamentos.

5.1.3 Massa do material seco de raízes

Na Tabela 18 são apresentados os resultados da massa do material seco das raízes das plantas de milho, para os 25 tratamentos, mostrando a média das quatro repetições.

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 7,87% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 1,92 g por planta.

A dose 50 do BIOFOM de vinhaça de melaço 30 (tratamento 8) somente apresentou diferença significativa dos BIOFOM de vinhaça de melaço 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 12 e 13), dos BIOFOM de vinhaça mista 30 nas doses 50 e 100 (tratamentos 2 e 4) e da Testemunha. Para este parâmetro, a Testemunha somente diferiu dos tratamentos de BIOFOM de vinhaça mista 30, nas doses 100 e 50 (tratamentos 8 e 10).

Tabela 18 - Massa de material seco das raízes das plantas de milho (MMSra) e respectivos testes de *Tukey*

	Tratamentos	MMSra (g planta^{-1})
1	Testemunha	8,25 C
2	Misto - 30-50	8,72 BC
3	Misto - 30-75	8,86 ABC
4	Misto - 30-100	8,10 C
5	Misto - 45-50	8,98 ABC
6	Misto - 45-75	8,67 ABC
7	Misto - 45-100	8,50 ABC
8	Melaço - 30-50	10,42 A
9	Melaço - 30-75	9,31 ABC
10	Melaço - 30-100	10,22 AB
11	Melaço - 45-50	9,14 ABC
12	Melaço - 45-75	8,39 BC
13	Melaço - 45-100	8,33 BC
14	Puro - 30-50	8,91 ABC
15	Puro - 30-75	9,92 ABC
16	Puro - 30-100	9,19 ABC
17	Puro - 45-50	9,79 ABC
18	Puro - 45-75	8,55 ABC
19	Puro - 45-100	9,07 ABC
20	Mineral - 100	9,14 ABC
21	Mineral - 75	9,64 ABC
22	Mineral - 50	9,38 ABC
23	Comple - Misto	8,66 ABC
24	Comple - Melaço	9,27 ABC
25	Comple - Puro	9,81 ABC

Letras iguais indicam que as médias não diferem significativamente ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

A Figura 39 mostra as raízes da planta de milho no momento da análise da massa do material seco, destacando o BIOFOM remanescente.

Figura 39 - (A) Detalhes das raízes da planta de milho submetidas aos tratamentos com BIOFOM. (B) BIOFOM remanescente nas raízes do milho

Fonte: Fotos do Autor, 2008

5.1.3.1 Macronutrientes

A Tabela 19 apresenta os resultados referentes ao acúmulo de macronutrientes nas raízes das plantas de milho (média das 4 repetições) e respectivos testes de *Tukey*.

Tabela 19 - Acúmulo de macronutrientes (mg planta^{-1}) nas raízes das plantas de milho e respectivos testes de *Tukey*

Tratamentos		Macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
1	Testemunha	52,01 F	2,47 C	5,27 C	5,09 E	5,80 C	11,28 CD
2	Misto - 30-50	80,58 DEF	6,19 ABC	37,39 BC	14,00 CDE	14,22 BC	12,52 BCD
3	Misto - 30-75	109,50 ABCD	7,71 ABC	62,52 ABC	20,15 BCD	21,15 ABC	21,48 BCD
4	Misto - 30-100	120,58 ABC	7,41 ABC	51,70 ABC	26,73 AB	27,00 AB	24,54 ABC
5	Misto - 45-50	86,28 BCDEF	16,23 AB	35,27 BC	12,79 CDE	11,88 BC	16,21 BCD
6	Misto - 45-75	91,41 ABCDE	8,12 ABC	58,15 ABC	20,17 BCD	21,74 ABC	25,51 ABC
7	Misto - 45-100	107,31 ABCD	9,21 ABC	72,45 ABC	34,25 A	34,51 A	38,09 A
8	Melaço - 30-50	81,08 DEF	7,69 ABC	53,32 ABC	17,69 BCD	10,58 BC	13,97 BCD
9	Melaço - 30-75	87,10 BCDEF	10,32 ABC	50,96 ABC	23,37 ABC	19,86 ABC	20,71 BCD
10	Melaço - 30-100	90,50 ABCDEF	7,66 ABC	70,19 ABC	17,97 BCD	11,87 BC	17,59 BCD
11	Melaço - 45-50	90,82 ABCDEF	6,78 ABC	54,70 ABC	17,09 BCDE	17,15 ABC	19,19 BCD
12	Melaço - 45-75	84,23 CDEF	7,36 ABC	52,96 ABC	19,99 BCD	17,62 ABC	20,96 BCD
13	Melaço - 45-100	96,83 ABCDE	8,15 ABC	89,87 AB	26,67 AB	27,99 AB	26,86 AB
14	Puro - 30-50	65,53 EF	4,51 BC	30,48 BC	9,47 DE	7,35 C	9,05 D
15	Puro - 30-75	82,59 CDEF	5,65 ABC	32,63 BC	12,01 CDE	10,58 BC	13,69 BCD
16	Puro - 30-100	85,52 BCDEF	6,71 ABC	71,48 ABC	17,25 BCD	14,92 BC	12,94 BCD
17	Puro - 45-50	81,83 CDEF	5,13 ABC	32,49 BC	14,43 CDE	9,46 BC	13,79 BCD
18	Puro - 45-75	76,57 DEF	5,92 ABC	40,30 BC	13,20 CDE	11,01 BC	13,15 BCD
19	Puro - 45-100	88,93 BCDEF	9,44 ABC	77,73 ABC	18,29 BCD	18,31 ABC	19,08 BCD
20	Mineral - 100	128,24 A	16,68 A	125,09 A	19,10 BCD	18,54 ABC	11,67 CD
21	Mineral - 75	123,54 AB	12,87 ABC	74,02 ABC	14,48 CDE	13,18 BC	11,74 CD
22	Mineral - 50	103,60 ABCDE	8,89 ABC	38,44 BC	10,89 DE	9,59 BC	10,06 D
23	Comple - Misto	74,95 DEF	8,34 ABC	101,66 AB	10,09 DE	14,22 BC	18,65 BCD
24	Comple - Melaço	80,60 DEF	9,22 ABC	78,75 ABC	12,79 CDE	14,32 BC	21,93 BCD
25	Comple - Puro	72,31 DEF	8,11 ABC	56,97 ABC	10,37 DE	11,32 BC	14,40 BCD

Para descrição detalhada dos tratamentos, vide Tabela 9. Letras iguais indicam que as médias não diferem significativamente ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

Nitrogênio (N)

Os resultados para este parâmetro apresentaram coeficiente de variação (CV) de 16,21% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 39,11 mg por planta. As três doses do fertilizante mineral (tratamentos 20 a 22) não diferiram significativamente entre si e nem dos BIOFOM de vinhaça de melaço 45 e 30 nas doses 100 (tratamentos 10 e 13), de vinhaça de melaço 45 na dose 50 (tratamento 11), além dos de vinhaça mista 30 e 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 3, 4,6 e 7).

A Testemunha somente diferiu das três doses do fertilizante mineral e dos BIOFOM de vinhaça de melaço 45 na dose 100 (tratamento 13), e de vinhaça mista 30 e 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 3, 4, 6 e 7).

Fósforo (P)

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 53,01% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 11,79 mg por planta. As três doses do fertilizante mineral não diferiram significativamente entre si. A dose 100 do fertilizante mineral (tratamento 20) somente diferiu significativamente do BIOFOM de vinhaça de caldo 30 nas doses 50 (tratamento 14) e da Testemunha. Esta, por sua vez, diferiu somente da dose 100 do fertilizante mineral e do BIOFOM de vinhaça misto 45 na dose 50 (tratamento 5).

Potássio (K)

O coeficiente de variação (CV) reportado para este parâmetro foi de 50,16% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 78,52 mg por planta.

A dose 100 do fertilizante mineral (tratamento 20) diferiu da dose 50 desse fertilizante (tratamento 22) e também dos tratamentos de BIOFOM de vinhaça de caldo 30 e 45 nas dosagens 50 e 75 (tratamentos 14,15,17 e 18), BIOFOM de vinhaça melaço+caldo 30 e 45 na dosagem 50 (tratamentos 2 e 5) e da Testemunha. Esta somente diferiu da dose 100 do fertilizante mineral e do BIOFOM de vinhaça de melaço 45 na dose 100, e a vinhaça mista concentrada (tratamento 25).

Cálcio (Ca)

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 26,88% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 12,10 mg por planta.

O BIOFOM de vinhaça mista 45 na dose 100 (tratamento 7) não diferiu estatisticamente do de vinhaça mista 30 na dose 100 (tratamento 4), e nem do BIOFOM de melaço 45 na dose 100 (tratamento 13), e do BIOFOM de melaço 30 na dose 75 (tratamento 9).

Para este parâmetro, a Testemunha somente diferiu da dose 100 do fertilizante mineral e dos BIOFOM de vinhaça de caldo 30 e 45 na dose 100 (tratamentos 16 e 19), de vinhaça de melaço 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 12 e 13), de vinhaça de melaço 30 nas três doses (tratamentos 8 a 10), e de vinhaça mista 30 e 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 3, 4,6 e 7).

Magnésio (Mg)

Os resultados para este parâmetro apresentaram coeficiente de variação (CV) de 43,98% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 18,66 mg por planta.

Os BIOFOM de vinhaça mista 30 e 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 3,4,6 e 7) não diferiram estatisticamente dos de vinhaça de melaço 45 nas três doses (tratamentos 11 a 13), de melaço 30 na dose 75 (tratamento 9), do de vinhaça pura 45 na dose 100 (tratamento 19) e do fertilizante mineral na dose 100 (tratamento 20).

A Testemunha somente diferiu do BIOFOM de vinhaça mista 30 e 45 na dose 100 (tratamentos 4 e 7), e do de vinhaça de melaço 45 na dose 100 (tratamento 13).

Enxofre (S)

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 30,63% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 14,47 mg por planta.

Os BIOFOM de vinhaça mista 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 6 e 7) e de vinhaça mista 30 na dose 100 (tratamento 4) não diferiram estatisticamente do de vinhaça de melaço 45 na dose 100 (tratamento 13). Para este parâmetro, a Testemunha somente diferiu dos BIOFOM de vinhaça mista e de melaço 45 na dose 100 (tratamentos 7 e 13).

5.1.3.2 Micronutrientes

A Tabela 20 apresenta os principais resultados do experimento referente ao acúmulo de micronutrientes nas raízes das plantas de milho, elucidando os 25 tratamentos, mostrando a média das quatro repetições.

Tabela 20 - Acúmulo de micronutrientes (μg planta^{-1}) nas raízes das plantas de milho e respectivos testes de *Tukey*

Tratamentos		Micronutrientes				
		B	Cu	Fe	Mn	Zn
1	Testemunha	178,02 A	168,15 ABCD	24887,94 ABC	2693,56 DE	173,12 A
2	Misto - 30-50	119,28 A	94,64 BCD	24642,83 ABC	3185,76 CDE	171,92 A
3	Misto - 30-75	134,97 A	93,14 BCD	24673,75 ABC	5173,41 ABC	177,41 A
4	Misto - 30-100	98,65 A	63,71 D	19635,06 BC	2761,12 DE	135,34 A
5	Misto - 45-50	112,67 A	99,19 BCD	25990,39 ABC	3897,24 ABCD	171,47 A
6	Misto - 45-75	143,47 A	79,06 CD	22591,60 ABC	3877,03 ABCDE	149,51 A
7	Misto - 45-100	168,43 A	90,63 BCD	21883,93 ABC	5644,91 AB	204,40 A
8	Melaço - 30-50	87,41 A	133,81 ABCD	31827,71 A	3298,86 BCDE	261,86 A
9	Melaço - 30-75	120,03 A	128,54 ABCD	27485,80 ABC	3931,13 ABCDE	263,39 A
10	Melaço - 30-100	123,09 A	108,79 BCD	27890,64 ABC	2375,43 DE	209,59 A
11	Melaço - 45-50	114,14 A	189,81 ABCD	23835,03 ABC	3166,41 CDE	221,21 A
12	Melaço - 45-75	171,59 A	218,88 ABCD	19418,60 BC	3272,59 BCDE	170,59 A
13	Melaço - 45-100	126,34 A	274,19 ABC	18815,14 C	4376,70 ABCD	196,96 A
14	Puro - 30-50	102,37 A	284,49 AB	24422,05 ABC	1859,33 E	205,85 A
15	Puro - 30-75	69,96 A	279,29 ABC	30399,69 A	3579,03 BCDE	227,05 A
16	Puro - 30-100	124,95 A	322,76 A	22949,44 ABC	3143,60 CDE	156,41 A
17	Puro - 45-50	106,76 A	320,23 A	29727,18 AB	2805,79 CDE	195,00 A
18	Puro - 45-75	142,87 A	266,17 ABCD	24482,16 ABC	2897,13 CDE	195,86 A
19	Puro - 45-100	183,31 A	262,71 ABCD	25438,40 ABC	3465,75 BCDE	232,87 A
20	Mineral - 100	193,23 A	279,09 ABC	25907,15 ABC	5983,21 A	198,25 A
21	Mineral - 75	122,15 A	282,68 ABC	28263,31 ABC	3973,74 ABCD	217,20 A
22	Mineral - 50	104,13 A	216,40 ABCD	27362,60 ABC	2908,37 CDE	164,60 A
23	Comple - Misto	118,22 A	142,38 ABCD	21803,73 ABC	2617,66 DE	124,68 A
24	Comple - Melaço	134,06 A	208,79 ABCD	23465,53 ABC	2684,14 DE	157,60 A
25	Comple - Puro	97,98 A	145,59 ABCD	28064,56 ABC	2785,31 DE	163,65 A

Para descrição detalhada dos tratamentos, vide Tabela 9. Letras iguais indicam que as médias não diferem significativamente ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

Boro (B)

Para o B, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 36,19% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 124,54 μg por planta.

Os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si.

Cobre (Cu)

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 40,01% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 204,66 μg por planta. A testemunha não diferiu significativamente dos tratamentos que acumularam mais Cu - os BIOFOM de vinhaça pura 45 na dose 50, e de vinhaça pura 30 na dose 100 (tratamentos 16 e 17) -, os quais diferiram significativamente apenas dos BIOFOM de vinhaça de melaço 30 na dose 100 (tratamento 10), e de vinhaça mista 30 e 45 nas três doses (tratamentos 2 a 7).

Ferro (Fe)

Os resultados, para este parâmetro, apresentaram coeficiente de variação (CV) de 15,39% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 10364 μg por planta. Os BIOFOM de melaço 30 na dose 50 e de vinhaça pura 30 na dose 75 (tratamentos 8 e 15) somente diferiram estatisticamente dos de vinhaça de melaço 45 nas doses 75 e 100 (tratamentos 12 e 13), e também do BIOFOM de vinhaça mista 30 na dose 100 (tratamento 4).

Manganês (Mn)

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 25,56% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 2374,8 μg por planta. A testemunha somente diferiu estatisticamente do fertilizante mineral na dose 100 (tratamento 20), e dos BIOFOM de vinhaça mista 45 na dose 100 (tratamento 7), e 30 na dose 75 (tratamento 3), que não diferiram entre si e os demais tratamentos não diferiram da testemunha.

Zinco (Zn)

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 30,52% e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 155,87 μg por planta.

Os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si.

5.1.4 Análise de terra dos vasos

A Tabela 21 mostra os principais resultados da análise da terra dos vasos para os parâmetros: Acidez, Matéria Orgânica, H + Al, Alumínio (Al), Soma de Bases (SB), Capacidade de Troca de Cátions (CTC), Saturação de Bases (V%), Saturação por Alumínio (M%), Sulfato ($S\text{-}SO_4^{-2}$), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Boro B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), e Zinco (Zn).

Tabela 21 - Análise da terra dos vasos após colheita do experimento e respectivos testes de *Tukey*

(continua)

	Tratamento	Acidez (pH $CaCl_2$)	M.O (g dm^{-3})	H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	Al $mmol_c$ dm^{-3}	SB ($mmol_c$ dm^{-3})	CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	V (%)
1	Testemunha	4,65 CDEF	12,75 B	25,00 BCDEF	0,50 CD	26,50 J	51,50 F	51,25 FGH
2	Misto - 30-50	4,53 EFG	15,00 AB	26,50 BCDE	0,75 BCD	28,00 GHIJ	54,50 EF	51,50 FGH
3	Misto - 30-75	4,70 BCDEF	15,00 AB	25,00 BCDEF	0,75 BCD	34,50 BCDEFGHI	59,50 BCDE	57,75 BCDEF
4	Misto - 30-100	4,98 AB	15,50 AB	21,25 EF	0,25 CD	44,00 A	65,25 AB	67,50 A
5	Misto - 45-50	4,73 ABCDEF	16,00 AB	25,00 BCDEF	0,50 CD	29,75 FGHIJ	54,75 EF	54,25 DEFGH
6	Misto - 45-75	4,85 ABCD	15,00 AB	24,25 CDEF	0,00 D	32,75 CDEFGHIJ	57,00 CDEF	57,25 BCDEFG
7	Misto - 45-100	4,80 ABCDE	14,25 AB	24,25 CDEF	0,00 D	41,00 AB	65,25 AB	63,00 ABCD
8	Melaço - 30-50	4,80 ABCDE	15,75 AB	24,25 CDEF	0,00 D	31,00 DEFGHIJ	55,25 EF	56,00 CDEFG
9	Melaço - 30-75	4,88 ABCD	15,25 AB	23,50 CDEF	0,00 D	34,75 BCDEFGH	58,25 BCDEF	59,25 ABCDEF
10	Melaço - 30-100	5,03 A	16,75 AB	20,50 F	0,00 D	39,75 ABC	60,25 BCDE	66,00 AB
11	Melaço - 45-50	4,83 ABCDE	15,75 AB	23,50 CDEF	0,00 D	30,25 FGHIJ	53,75 EF	56,50 CDEFG
12	Melaço - 45-75	4,83 ABCDE	15,00 AB	24,25 CDEF	0,25 CD	33,00 BCDEFGHIJ	57,25 CDEF	58,00 BCDEF
13	Melaço - 45-100	4,95 ABC	15,25 AB	21,50 EF	0,00 D	38,25 ABCDE	59,75 BCDE	64,00 ABC
14	Puro - 30-50	4,70 BCDEF	15,50 AB	25,00 BCDEF	0,50 CD	29,00 FGHIJ	54,00 EF	53,50 EFGH
15	Puro - 30-75	4,75 ABCDE	15,25 AB	24,25 CDEF	0,50 CD	31,25 EFGHIJ	55,50 DEF	56,25 CDEFG
16	Puro - 30-100	4,78 ABCDE	15,25 AB	24,25 CDEF	0,25 CD	31,25 EFGHIJ	55,50 DEF	56,25 CDEFG
17	Puro - 45-50	4,60 DEFG	16,25 AB	25,75 BCDEF	0,75 BCD	27,00 HIJ	52,75 EF	51,25 FGH
18	Puro - 45-75	4,78 ABCDE	16,25 AB	24,25 CDEF	0,25 CD	30,50 EFGHIJ	54,75 EF	56,00 CDEFG
19	Puro - 45-100	4,95 ABC	18,00 A	23,00 DEF	0,25 CD	35,25 BCDEFG	58,25 BCDEF	60,50 ABCDE
20	Mineral - 100	4,43 FG	16,25 AB	30,25 AB	1,25 ABC	26,75 IJ	57,00 CDEF	46,75 H
21	Mineral - 75	4,30 G	16,50 AB	34,25 A	1,75 AB	29,50 FGHIJ	63,75 ABC	46,00 H
22	Mineral - 50	4,30 G	17,25 A	35,25 A	2,00 A	33,25 BCDEFGHIJ	68,50 A	48,50 GH
23	Comple - Misto	4,73 ABCDEF	17,75 A	27,25 BCD	1,00 ABCD	38,50 ABCD	65,75 AB	58,25 BCDEF
24	Comple - Melaço	4,60 DEFG	15,50 AB	28,75 BC	0,75 BCD	31,50 DEFGHIJ	60,25 BCDE	52,25 EFGH
25	Comple - Puro	4,80 ABCDE	17,00 AB	26,50 BCDE	0,50 CD	36,75 ABCDEF	63,25 ABCD	58,25 BCDEF

Tabela 21 - Análise da terra dos vasos após colheita do experimento e respectivos testes de *Tukey* (continuação)

	Tratamentos	M (%)	$S\text{-}SO_4^{-2}$ (mg dm^{-3})	P (mg dm^{-3})	K ($mmol_c$ dm^{-3})	Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	Mg ($mmol_c$ dm^{-3})
1	Testemunha	2,00 BCD	14,25 KLM	5,75 E	0,35 H	12,50 E	13,50 ABCDE
2	Misto - 30-50	2,50 ABCD	16,50 JKLM	19,25 E	1,23 GH	15,75 ABCDE	11,00 CDE
3	Misto - 30-75	2,25 ABCD	35,75 FGH	38,00 E	4,55 BCDEF	17,00 ABCD	13,00 ABCDE
4	Misto - 30-100	0,50 D	51,50 CDE	54,75 DE	10,18 A	18,25 AB	15,75 AB
5	Misto - 45-50	1,50 CD	24,75 HIJKL	21,50 E	1,55 FGH	15,00 BCDE	13,25 ABCDE
6	Misto - 45-75	0,00 D	42,00 EFG	26,00 E	2,95 EFGH	15,25 BCDE	14,50 ABCDE
7	Misto - 45-100	0,00 D	65,75 BC	47,50 DE	7,48 AB	18,00 ABC	13,00 ABCDE
8	Melaço - 30-50	0,00 D	21,50 HIJKLM	32,00 E	2,93 EFGH	15,00 BCDE	13,75 ABCDE
9	Melaço - 30-75	0,00 D	29,00 GHIJK	35,50 E	4,55 BCDEF	16,25 ABCD	15,00 ABC
10	Melaço - 30-100	0,00 D	31,50 GHI	49,00 DE	6,50 BC	18,25 AB	13,00 ABCDE
11	Melaço - 45-50	0,00 D	27,25 GHIJK	21,75 E	1,83 EFGH	15,50 ABCDE	12,75 ABCDE
12	Melaço - 45-75	0,75 D	49,50 DEF	28,50 E	2,90 EFGH	17,50 ABC	14,00 ABCDE
13	Melaço - 45-100	0,00 D	62,75 BCD	35,50 E	6,05 BCD	18,00 ABC	15,50 AB
14	Puro - 30-50	1,75 CD	17,25 IJKLM	16,25 E	1,63 FGH	14,50 CDE	12,50 ABCDE
15	Puro - 30-75	1,50 CD	16,50 JKLM	18,00 E	2,35 EFGH	15,50 ABCDE	13,25 ABCDE
16	Puro - 30-100	0,75 D	22,25 HIJKLM	26,50 E	3,38 DEFG	15,25 BCDE	12,50 ABCDE
17	Puro - 45-50	2,50 ABCD	11,00 LM	17,75 E	1,75 FGH	13,50 DE	11,50 BCDE
18	Puro - 45-75	0,75 D	19,75 IJKL	27,00 E	2,28 EFGH	15,25 BCDE	13,00 ABCDE
19	Puro - 45-100	0,75 D	30,75 GHIJ	44,00 DE	3,80 CDEFG	16,75 ABCD	14,75 ABCD
20	Mineral - 100	4,50 ABC	11,00 LM	166,75 AB	1,88 EFGH	14,50 CDE	10,25 E
21	Mineral - 75	5,75 A	9,75 M	205,50 A	2,70 EFGH	16,00 ABCDE	10,50 DE
22	Mineral - 50	5,50 AB	14,75 QLM	218,25 A	4,80 BCDE	17,50 ABC	11,00 CDE
23	Comple - Misto	2,75 ABCD	73,50 AB	96,00 CD	3,75 CDEFG	18,50 AB	16,00 A
24	Comple - Melaço	2,25 ABCD	40,00 EFG	125,50 BC	2,58 EFGH	15,75 ABCDE	13,00 ABCDE
25	Comple - Puro	1,50 CD	82,25 A	145,00 BC	2,63 EFGH	19,00 A	15,25 ABC

Tabela 21 - Análise da terra dos vasos após colheita do experimento e respectivos testes de *Tukey* (continuação)

	Tratamentos	B ($mg\ dm^{-3}$)	Cu ($mg\ dm^{-3}$)	Fe ($mg\ dm^{-3}$)	Mn ($mg\ dm^{-3}$)	Zn ($mg\ dm^{-3}$)
1	Testemunha	0,24 A	1,20 A	25,3 G	30,3 I	1,38 B
2	Misto - 30-50	0,27 A	1,05 A	31,0 CDEFG	59,1 EFGH	1,65 AB
3	Misto - 30-75	0,25 A	0,90 A	31,3 CDEFG	67,6 CDEFG	1,78 AB
4	Misto - 30-100	0,28 A	0,93 A	28,3 EFG	75,3 ABC	1,98 AB
5	Misto - 45-50	0,27 A	1,08 A	29,0 EFG	54,1 H	1,63 AB
6	Misto - 45-75	0,27 A	0,93 A	28,5 EFG	57,0 GH	1,58 AB
7	Misto - 45-100	0,25 A	0,98 A	33,0 BCDEF	73,0 BCD	2,00 AB
8	Melaço - 30-50	0,25 A	1,15 A	27,8 FG	57,2 FGH	1,90 AB
9	Melaço - 30-75	0,26 A	1,15 A	28,3 EFG	55,3 H	1,55 AB
10	Melaço - 30-100	0,23 A	1,15 A	27,5 FG	56,6 GH	1,73 AB
11	Melaço - 45-50	0,21 A	1,15 A	29,5 DEFG	52,7 H	1,50 AB
12	Melaço - 45-75	0,24 A	1,10 A	30,0 CDEFG	54,4 H	1,53 AB
13	Melaço - 45-100	0,23 A	1,10 A	28,0 FG	61,1 DEFGH	1,65 AB
14	Puro - 30-50	0,23 A	1,10 A	30,0 CDEFG	54,6 H	1,53 AB
15	Puro - 30-75	0,22 A	1,05 A	28,8 EFG	54,9 H	1,53 AB
16	Puro - 30-100	0,23 A	1,10 A	30,8 CDEFG	55,7 GH	1,68 AB
17	Puro - 45-50	0,25 A	1,33 A	31,8 CDEFG	62,9 DEFGH	1,68 AB
18	Puro - 45-75	0,24 A	1,20 A	34,8 BCDEF	67,4 CDEFG	1,78 AB
19	Puro - 45-100	0,26 A	1,33 A	31,0 CDEFG	70,2 BCDE	2,10 AB
20	Mineral - 100	0,25 A	1,05 A	37,0 ABCD	75,2 ABC	1,40 AB
21	Mineral - 75	0,24 A	1,23 A	40,5 AB	80,5 AB	1,75 AB
22	Mineral - 50	0,23 A	2,15 A	44,3 A	85,3 A	2,75 A
23	Comple - Misto	0,23 A	1,50 A	37,5 ABC	70,5 BCDE	1,73 AB
24	Comple - Melaço	0,22 A	1,38 A	37,3 ABC	71,6 BCD	1,65 AB
25	Comple - Puro	0,24 A	1,13 A	35,8 BCDE	69,1 BCDEF	1,48 AB

Para descrição detalhada dos tratamentos, vide Tabela 9. Letras iguais indicam que as médias não diferem significativamente ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey

Acidez

De uma forma geral, os tratamentos cuja produção de massa de material seco foi maior, apresentaram valor de pH em $CaCl_2$ menores; assim, as três dosagens do fertilizante mineral não apresentaram diferenças significativas entre si e apresentaram os menores valores de pH em $CaCl_{2.,}$ enquanto o BIOFOM de vinhaça mista 30 na dosagem 100 (tratamento 4), que teve uma das menores produções de massa de material seco, apresentou um dos maiores valores de pH em $CaCl_2$.

Isso já era esperado, pois, as plantas ao absorverem os nutrientes da solução do solo, retiram cátions considerados básicos e liberam H^+, promovendo um aumento na atividade de H^+ suficiente para reduzir os valores de pH em $CaCl_2$ determinados, por se tratarem de vasos com 2 kg de terra.

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 2,46 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 0,31.

Matéria orgânica

Os tratamentos cuja produção de massa de material seco foi maior apresentaram os maiores teores de matéria orgânica. As três dosagens do fertilizante mineral e as três vinhaças complementadas (tratamentos 20 a 25), que não apresentaram diferenças significativas entre si, apresentaram os maiores teores de matéria orgânica. A testemunha, que apresentou a menor produção de massa de material seco, também apresentou o menor teor de matéria orgânica.

As plantas ao crescerem produzem radículas que são difíceis de separar (o que foi observado quando o vaso foi desfeito para análise das amostras de solo), além disso compostos orgânicos podem ser liberados pelas raízes no processo de absorção. Por se tratarem de vasos com 2 kg de terra, essa contribuição deve ter sido suficiente para alterar os teores de matéria orgânica determinados.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 10,42 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 4,42 g dm^{-3}.

H+Al

H+Al está relacionado com o pH, ou seja, quando os valores de pH do solo diminuem, o teor de H+Al aumenta. Como o pH diminuiu em função do crescimento das plantas, de uma forma geral observa-se que as três dosagens do fertilizante mineral, que não apresentaram diferenças significativas entre si, apresentaram os maiores teores de H+Al. Estes, por sua vez, aumentaram em função da dosagem, enquanto o BIOFOM de vinhaça mista 30 na dosagem 100 (tratamento 4), que teve a menor produção de massa de material seco, apresentou um dos menores teor de H+Al.

Isso já era esperado, pois, as plantas ao absorverem nutrientes da solução do solo, retiram cátions considerados básicos liberando H+, promovendo um aumento na quantidade de H+ suficiente para aumentar os teores de H+Al determinados, por se tratarem de vasos com 2 kg de terra.

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 7,86 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 5,39 $mmol_c\ dm^{-3}$.

Alumínio (Al)

O teor de Al está relacionado com o pH, ou seja, quando os valores de pH do solo diminuem, o teor de Al aumenta – considerando que o material de origem do solo possui um teor elevado de alumínio.

Como o pH diminuiu em função do crescimento das plantas, de uma forma geral, observa-se que as três dosagens do fertilizante mineral que não apresentaram diferenças significativas entre si apresentaram os maiores teores de Al.

Assim como comentado no item anterior, no processo de absorção de nutrientes da solução do solo, as plantas retiram cátions considerados básicos e liberam H+, o que, na unidade analisada (vaso de 2 kg), promoveu um aumento na quantidade de H+ suficiente para aumentar o pH e aumentar os teores de Al determinados.

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 82,74 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 1,14 $mmol_c\ dm^{-3}$.

Soma de bases (SB)

Este parâmetro é resultante da soma dos resultados de K, Ca e Mg e, portanto, acumula as variações e os efeitos dessas três determinações. De uma forma geral, nos tratamentos que as plantas cresceram mais, foram reportadas as menores soma de bases nas amostras de terra; assim, o BIOFOM de vinhaça mista 30 na dosagem 100 (tratamento 4), que teve uma das menores produções de massa de material seco, apresentou a maior soma de bases.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 8,93 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 7,92 $mmol_c\ dm^{-3}$.

CTC

A CTC é resultante da soma dos resultados de K, Ca, Mg e H+Al e, portanto, acumula as variações e os efeitos dessas quatro determinações. O BIOFOM de vinhaça mista 30 na dosagem 100, que teve uma das menores produções de massa de material seco, apresentou uma das maiores CTC.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 5,06 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 7,95 $mmol_c\ dm^{-3}$.

Saturação por bases (V%)

A saturação por bases aumenta com o aumento do pH e diminui com a sua diminuição, por isso, de uma forma geral, nos tratamentos em que as plantas cresceram mais, o pH da terra dos vasos diminuiu mais e assim, apresentaram saturações por bases menores.

De uma forma geral, nos tratamentos com BIOFOM, as saturações por base diminuíram com o aumento da dosagem.

Para este parâmetro, os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 5,84 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 8,83 %.

Saturação por Al (m%)

De uma forma geral, as saturações por alumínio acompanharam a distribuição dos teores deste elemento e, os mesmos comentários feitos para este parâmetro valem aqui.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 89,90 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 3,72 %.

$S\text{-}SO_4^{-2}$

A grande contribuição de $S\text{-}SO_4^{-2}$ nos resíduos utilizados na fabricação do BIOFOM vem da sulfitação realizada na produção do açúcar e, portanto, reflete na torta de filtro e na vinhaça de melaço e, por consequência, na vinhaça de melaço + caldo. Assim, de uma forma geral, os tratamentos com BIOFOM de vinhaça de melaço e mista foram os que mais aumentaram os teores de $S\text{-}SO_4^{-2}$ nas amostras de terra, enquanto que o fertilizante mineral não apresentou aumento em relação à testemunha.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 16,9 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 14,92 mg dm^{-3}.

Fósforo (P)

Os tratamentos em que esse nutriente estava prontamente disponível apresentaram os maiores teores de fósforo nas amostras de terra, assim, as três dosagens do fertilizante mineral e as três vinhaças complementadas apresentaram diferenças significativas dos demais tratamentos.

Nos dezoito tratamentos contendo BIOFOM, a parte do fertilizante que permaneceu nos vasos após a colheita do experimento foi separada e analisada. Sendo assim, não está incluída no resultado dessas análises, enquanto que nos 6 tratamentos que apresentaram os maiores teores de P (tratamentos 20 a 25), não foi feita a separação. Essa diferença já era esperada, pois cerca de 33% do nutriente ficou no BIOFOM que restou nos vasos e foi retirado da análise da terra, devendo ter sido o responsável pela diferença observada.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 35,11 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 57,49 mg dm^{-3}.

Potássio (K)

De uma forma geral, os tratamentos em que esse nutriente estava prontamente disponível e que as plantas de milho cresceram mais, apresentaram menores teores de K nas amostras de terra.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 32,31 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 3,01 $mmol_c\ dm^{-3}$.

Cálcio (Ca)

Como a adição de cálcio foi feita através do $CaCO_3$, os tratamentos em que as plantas de milho cresceram mais, apresentaram menores teores de Ca nas amostras de terra.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 8,14 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 3,54 $mmol_c\ dm^{-3}$.

Magnésio (Mg)

De uma forma geral, como a adição de Mg foi feita através do MgO, os tratamentos em que as plantas de milho cresceram mais, apresentaram menores teores de Mg nas amostras de terra.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 11,99 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 4,28 $mmol_c\ dm^{-3}$.

Boro (B)

Os tratamentos não afetaram os teores de B nas amostras de terra, uma vez que a terra dos vasos sofreu o mesmo tratamento e, pela análise dos BIOFOM, observa-se que todos tinham a mesma quantidade de B.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 16,58 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 0,11 mg dm^{-3}.

Cobre (Cu)

Assim como para o B, os tratamentos não afetaram os teores de Cu nas amostras de terra.

Para este parâmetro, os resultados foram coeficiente de variação (CV) de 41,69 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 1,32 mg dm^{-3}.

Ferro (Fe)

A disponibilidade do Fe aumenta com o aumento da acidez do solo; assim, os tratamentos em que a produção de material seco foi maior, e que tiveram o valor do pH diminuído, apresentaram maiores teores de Fe.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 8,75 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 7,50 mg dm^{-3}.

Manganês (Mn)

De uma forma geral, a disponibilidade do Mn aumenta com o aumento da acidez do solo; assim, os tratamentos em que a produção de material seco foi maior, e que tiveram o valor do pH diminuído, apresentaram maiores teores de Mn.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 7,15 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 12,09 mg dm^{-3}.

Zinco (Zn)

Os tratamentos em que as plantas cresceram mais apresentam menores teores de Zn, embora somente a dosagem 50 do fertilizante mineral (tratamento 22), tenha diferido da testemunha.

Os resultados apresentaram coeficiente de variação (CV) de 29,45 % e diferença mínima significativa (d.m.s.) (ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey) de 1,36 mg dm^{-3}.

Tanto para os macronutrientes quanto para os micronutrientes deve-se atentar que, nos tratamentos de BIOFOM, a parte que permaneceu nos vasos após a colheita do experimento foi isolada e analisada separadamente e, assim, não está incluída nessas análises, enquanto que nos tratamentos com fertilizante mineral e com as vinhaças complementadas não houve separação. Assim, o nutriente que ficou no BIOFOM que restou nos vasos foi retirado da análise da terra e deveria ser somado a este para se ter o total que restou nos vasos.

5.2 Considerações Finais

O uso de BIOFOM pode diminuir os custos de produção, com destaque tanto à redução nos custos com fertilizante mineral, quanto na redução de custos com transporte, operações e infraestrutura, dada a eliminação da aplicação de vinhaça, da torta de filtro e das cinzas; separadamente no campo;

O BIOFOM elimina o mau cheiro da vinhaça, podendo ser formulado de acordo com as necessidades específicas da cultura;

Comparando o adubo mineral e o BIOFOM (Figura 40) verifica-se que o adubo mineral possui apenas 3 macronutrientes (N, P e K) ao passo que o BIOFOM, além destes, possui outros macronutrientes como Cálcio, Magnésio, Enxofre, Micronutrientes e mais de 40% de Matéria Orgânica, conforme pode ser observado na Tabela 13. A Figura 40 ilustra a comparação entre o Adubo Mineral e o Biofom;

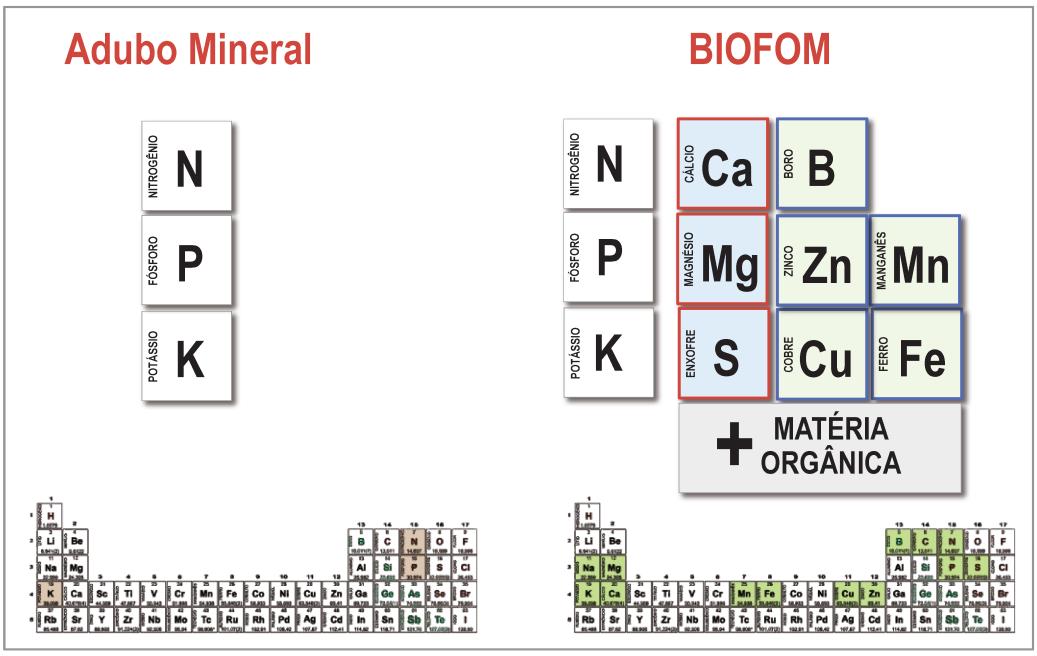

Figura 40 - Comparação entre adubo mineral e BIOFOM.

A matéria orgânica aplicada via BIOFOM promove a melhoria das propriedades físico-químicas do solo, na capacidade de troca de cátions (CTC) e porosidade, o que favorece a absorção de nutrientes e reduz perdas causadas por lixiviação;

Conforme mostrado na Figura 41, após 60 dias do plantio do milho, observou-se que o BIOFOM estava aderido às raízes devido à sua condição de biofertilizante onde a matéria orgânica possibilita uma liberação gradual dos nutriente.

Figura 41 - Raíz de Milho com BIOFOM aderido.

A alternativa tecnológica proposta reduz a geração de resíduos da indústria sucroalcooleira, aproveitando-os racionalmente para produção de biofertilizantes organominerais. O BIOFOM é uma solução sustentável, além de estar de acordo com as legislações vigentes. Seu uso traz, portanto, benefícios ao ambiente, pois todos os resíduos produzidos no processamento da cana de açúcar, podem ser transformados em BIOFOM, minimizando o risco de poluição de aquíferos e do solo pela lavagem dos resíduos.

5.3 Recomendações para novas pesquisas

a) Testar o BIOFOM em outras culturas. Apesar de testado para milho, o BIOFOM pode ser utilizado em várias culturas. Para a cultura de cana de açúcar, cujo ciclo é maior do que a cultura testada, espera-se que o desempenho do BIOFOM seja semelhante aos tratamentos com fertilizante mineral, devido ao grânulo do biofertilizante, contendo matéria orgânica e nutrientes, ficar aderido à raiz;
b) Desenvolver formas mais acessíveis de utilização do Biofom, como por exemplo, formas não granulares;
c) Avaliar a mitigação de CO2 com o uso do BIOFOM rastreando as emissões dos gases na cadeia produtiva dos fertilizantes minerais.

6 CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos, conclui-se que:

O BIOFOM pode substituir a utilização do fertilizante mineral, sendo que os BIOFOM de vinhaça de caldo puro 30 e 45 e os de vinhaça de melaço 30 tiveram o mesmo desempenho do fertilizante mineral e das três vinhaças complementadas e; os BIOFOM de vinhaça mista 30 e 45 e os de vinhaça de melaço 45, com pequenos ajustes nas quantidades do fertilizante mineral adicionados, poderão ter a mesma performance do fertilizante mineral e das três vinhaças complementadas;

A integração das tecnologias para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado, envolvendo a concentração de vinhaça, proporciona oportunidades para o reaproveitamento de águas evaporadas em processos de recirculação e fechamento de circuitos, permitindo, também, a minimização da captação de águas pelas agroindústrias sucroalcooleiras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Lista de Concessionários e Estatísticas sobre a Energia Elétrica no Brasil.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 3 jul. 2011.

ARANHA, C.; YAHN, C.A. Botânica da cana de açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.) **Cana de açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.1, p.3-13.

ASSAN, M.A.C. **Avaliação do desempenho de um reator biológico de discos rotativos (biodisco) no tratamento de efluentes da indústria sucroalcooleira**. 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologia, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2006.

BARBOSA, V. Novas tecnologias no uso da vinhaça e aspectos legais. In: Marques, M.O. et al. (Ed.). **Tópicos em tecnologia sucroalcooleira**. Jaboticabal, UNESP, 2006, p.141-150.

BASSOI, L.J.; GUAZELLI, M.R. Controle ambiental da água. In: PHILIPPI Jr., A.; OMÉRO, M.A.; BRUNA, G.C. (Ed.). **Curso de gestão ambiental**. Barueri-SP: Manole, 2004. p.53-99.

BERTONCIN, E. **Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo - Programa de Pesquisa em Políticas Públicas (PPPP).** Disponível em: http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/apresentacao_painel_4_edna.pdf. Acesso em: 12 mar. 2012.

BIASE, L.P. Aspectos Gerais da concentração das vinhaças. In: II WORKSHOP DE GESTÃO DE ENERGIA E RESÍDUOS NA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA, 2007, Pirassununga. **Anais**. Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, USP, 2007. Disponível em: <http://www.fzea.usp.br/green/GERA/Luiz%20Paulo%20De%20 Biase.doc>. Acesso em: 20 nov. 2011.

BOSCARIOL, F.C. **Dedini concentração de vinhaça – Evaporação tipo névoa turbulenta**. Disponível em: <www.dedini.com.br>. Acesso em: 10 mai. 20011.

BRAUNBECK, O.A.; CORTEZ, L.A.B. O cultivo da cana de açúcar e o uso dos resíduos. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY; S.V.; ROTHMAN, H.; (Org.). **Uso de biomassa para produção de energia na indústria brasileira.** 1ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2005, v.1, p.215-246.

CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da cultura da cana de açúcar. In: CÂMARA, G.M.S., OLIVEIRA E.A.M. (Ed.). **Produção de cana de açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p.31-64.

CAMHI, J. D. Tratamento do vinhoto, subproduto da destilação de etanol. **Brasil Açucareiro**, v.94, n.1, p.18-23, 1979.

CAMPANHOLA, C.; LUIZ, A.J.B.; LUCCHIARI JÚNIOR, A. O problema ambiental no Brasil: agricultura. In: ROMEIRO, A. R. et al. (Org.). **Economia do meio ambiente: teoria, política e a gestão de espaços regionais**. Campinas: EMBRAPA/UNICAMP, 3º Edição, 2001. p.269-272.

CANABRAVA, A.P. **História econômica: estudos e pesquisas**. São Paulo: UNESP, 2005. 320p.

CARNAÚBA, B.A.A. O nitrogênio e a cana de açúcar. **STAB - Açúcar, Etanol e Sub-produtos**, Piracicaba, v.8, n.3, p.24-41, 1990.

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

CENTRO DE TECNOLOGIA COPERSUCAR. Cadernos Copersucar. **Série Agronômica**, n.1, 1981.

CENTRO DE TECNOLOGIA COPERSUCAR. Cadernos Copersucar. **Série Industrial**, n.16, 2002.

CENTRO DE TECNOLOGIA COPERSUCAR. **Biomass power generation: sugarcane bagasse and trash**. Disponível em: <http://www.ctcanavieira.com.br>, Acesso em: 15 de ago. 2008.

DONZELLI, J.L. "Preservation of agricultural soil". In: Macedo, I.C. (ed.) **Sugarcane's Energy. Twelve studies on Brazilian sugarcane agribusiness and its sustainability**. 2005, p.157-161. São Paulo: UNICA, 2008. Disponível em: <https:english.unica.com.br>. Acesso em: 20 de jun. 2009

ELIA NETO, A; NAKAHODO, T. **Caracterização físico-química da vinhaça**. Projeto nº 9500278. Relatório técnico da Seção de Tecnologia de Tratamento de Águas do Centro de Tecnologia COPERSUCAR, Piracicaba, 1995, 26p.

ELIA NETO, A. **'Workshop sobre cobrança pelo uso da água'** – CBH-PCJ Relatório da palestra para o workshop cobrança pelo uso da água, comitê Bacia Hidrográfica Piracicaba, Capivari e Jundiaí 1996 – Piracicaba, SP, 1996. 8p.

ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A. Usos e Reusos de Água e Geração de Efluentes. In: **Manual de Conservação e Reuso de Água na Agroindústria Sucroalcooleira**. Agência Nacional de Águas; Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; União da Indústria da Cana de açúcar; Centro de Tecnologia Canavieira. Brasília: ANA, 2009

FLOSS, E.L.; FLOSS, L.G. Fertilizantes organominerais de última geração: funções fisiológicas e uso na agricultura. **Revista Plantio Direto**, julho/agosto de 2011. Passo Fundo: Aldeia Norte Editora. Disponível em: <http://www.plantiodireto.com.br>. Acesso em: 23 de jun. 2011.

FRACARO, J. **Análise histórica do Proetanol e atuais perspectivas do setor alcooleiro no Brasil**. 2005. 67p. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas), Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

FRANCO, M. **Integração energética de sistemas de evaporação localizados abaixo do ponto pinch**. Campinas, São Paulo, 2001. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

GERMECK, H.A.; FEIGL, G.F. Processo de redução de vinhaça. **STAB - Açúcar, Etanol e Sub- produtos**, Piracicaba, v.6, n.4, p.42-50, 1987.

GLAZ, B.; EDME, S.J.; MILLER, J.D.; MILLIGAN, S.B.; HOLDER, D.G. Sugarcane cultivar response to high summer water tables in the Everglades. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, p.624-629, 2002.

GLÓRIA, N.A. **Emprego da vinhaça para fertilização**. Piracicaba, CODISTIL, 1976. 31p.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça como fertilizante. São Paulo: **Copersuca**r, 1983. 38p.

GOMES, J.F.F. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana de açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2003. 75p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2003.

GURGEL, M.N.A. A Usina Dedini para Produção de BIOFOM - Biofertilizante Organomineral, **SIMTEC** - Piracicaba, São Paulo, 2009a. Disponível em: <www.dedini.com.br>. Acesso em 10 mai. 2011.

GURGEL, M.N.A. Relatório interno da Divisão de Engenharia de Tecnologias. Dedini, 2009b.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. Ed: Mestre Jou, São Paulo. 1969, 1v.

JENDIROBA, E. Questões ambientais no manejo da agroindústria canavieira. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana de açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 347-357.

KIEL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

LEÃO, R.M. **Etanol: a energia verde**. São Paulo: Iqual Editora, 2002. 255p.

MACHADO, F.B.P. Brasil, a doce terra - História do Setor. **ProCana.com**, Ribeirão Preto, 19 nov. 2003. Disponível em: < http://www.jornalcana.com.br/Conteudo/HistoriadoSetor.asp> Acesso em: 2 jul. 2011.

MANE, J.D.; MODI, S.; NAGAWADE, S.; PHADNIS, S.P.; BHANDARI, V.M. Treatment of spent wash using chemically modified bagasse and color removal studies. **Bioresource Technology**, v. 97, V.14, p.1752-1755, 2006.

MENEGHETTI, S. Proetanol - Programa Brasileiro de Etanol. **Biodieselbr**, 2007. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com>. Acesso em: 11 jun. 2011.

MANTELATTO, P.E.; OLIVERIO, J.A.; BOSCARIOL, F.C.; CIAMBELLI, J.R.; PEREIRA CÉSAR, A.R.; GURGEL, M.N.A. **Processo para Produção de Fertilizante Organomineral**. PI-0801794-8, 2007. Disponível em: <www.dedini.com.br>. Acesso em: 10 mai. 20011.

MATSUOKA, S. **Botânica e ecofisiologia da cana de açúcar. Apostila: Curso de Qualificação em Plantas Industriais – Cana de açúcar**, São Paulo, 1996. 93p.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A.A.A.; ARIZONO, H. Melhoramento da cana de açúcar. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: Editora UFV, 1999. p.205-251.

MEYER, B.; ANDERSON, D.; BOHNING, R. **Introdução à fisiologia vegetal**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1973. 710p.

MOHR, H.; SCHOPFER, P. **Plant physiology**. New York: Springer - Verlag, 1995. 629p.

NAIK, N.M.; JAGADEESH, K.S.; ALAGAWADI, A.R. Microbial decolorization of spent wash: a review. **Indian Journal of Microbiology**, Nova Deli, v.48, p.41-48, 2008.

NANNIPIERI, P.; GREGO, S.; DELL'AGNOLA, G.; NARDI, S. Proprietá biochemiche e fisiologiche della sostanza orgânica. In: NANNIPIERI, P. (Ed.). **Ciclo della sostanza orgânica nel suolo: aspetti agronomici, chemici, ecologici & selvicolturali**. Bologna: Patron, 1993. p.67- 78.

OLIVÉRIO, J.L.; CARMO, V.B.; GURGEL, M.N.A. The DSM – Dedini sustainable Mill: a new concept in designing complete sugarcane mills. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technology**, Mexico, v.27, p. 1-32, 2010.

OLIVÉRIO,J.L.; BOSCARIOL, F.C.; MANTELATTO,P.E.; CÉSAR, A.R.P.; CIAMBELLI, J.R.P.; GURGEL, M.N.A; SOUZA, R.T.G.de. Integrated production of organomineral biofertilizer (BIOFOM) using by products from the sugar and ethanol agroindustry, associated with the cogeneration of energy. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technology**, Mexico, v.27, p.1-7, 2010a.

OLIVÉRIO, J.L.; BOSCARIOL, F.; PEREIRA CÉSAR, A.R.; GURGEL, M.N.A; MANTELATTO,P.E.; YAMAKAWA, C.K. Water production plant. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technology**, Mexico, v.27, p.1-5, 2010b.

ORTEGA FILHO, S. **O potencial da agroindústria canavieira do Brasil**. Serrana, PHB Industrial, 2003. 9p.

PEREIRA, L.L.; TORREZAN, H.F. Colheita mecanizada da cana de açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana de açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p.333-344.

PIACENTE, F.J. **Agroindústria canavieira e o sistema de gestão ambiental: o caso das usinas localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.** 2005. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) - Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

RAMOS, H.R. **The Institutional and Organizational Environment and the Competitiveness of the Alcohol Agroindustry in Brazil**. VI International Pensa Conference on "Sustainable Agri-food and Bioenergy Chains/Networks Economics and Management. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, outubro 2007.

RIBEIRO, F.M.G. **Usos da água na indústria sucroalcooleira: Estudo de caso.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana de açúcar: colheita, energia e ambiente**. 2.ed. Piracicaba: Ed. Autor, 2005. 302p.

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

SPADOTTO, C.A. Gestão **de Resíduos: realizações e desafios no setor sucroalcooleiro.** Disponível em: <http://www.embrapa.gov.br/imprensa/artigos/2008/gestao-de-residuos-realizacoes-edesafios- no-setor-sucroalcooleiro>. Acesso em: 1 de out.2008.

STRAPASSON, A. B.; JOB, L. C. M. de A. Etanol, Meio Ambiente e Tecnologia. **Revista de Política Agrícola do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).** Edição especial: Agroenergia, ano XV, n.3, jul. 2006.

SILVA, G.M.A. Tratamento e utilização agroindustrial da vinhaça. ***Saccharum***, v.4, n.15, p.30-32, 1981a.

SILVA, G. M.A. Tratamento e utilização agroindustrial da vinhaça. **Brasil Açucareiro**, v.97, n.6, p.38-41, 1981b.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana de açúcar no Estado de Alagoas: propriedades químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.2, p.291-299, 1998.

SILVA, J.E.A.R. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana de açúcar**. 2006. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

SILVA, V.L.M.M.; GOMES, W.C.; ALSINA, O. L.S. Utilização do bagaço de cana de açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v.2, p.27-32, 2007.

SINHA, R.K. **Modern plant physiology**. Pangbourme: Alpha Science International Ltd., 2004. 620p.

SOUZA, S.V. Métodos de utilização e aplicação de vinhaça. Disponível em <http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/ workshop_vinhaça_sessão2_veronez.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2011.

SZMRECSÁNYI, T. Tecnologia e degradação ambiental: o caso da agroindústria canavieira no Estado de São Paulo. **Revista Informações Econômicas**, São Paulo, v.24, n.10, p.73-81, 1994.

SZMRECSÁNYI, T.; RAMOS, P.; RAMOS FILHO, L.O.; VEIGA FILHO, A.A. **Dimensões, riscos e desafios da atual expansão canavieira**. Texto para Discussão 32. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. São Paulo: Artmed, 2004. 719p.

TING. I.P. **Plant physiology**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company. 1982. 642p.

UNIÃO DA AGROINDÚSTIA CANAVIEIRA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa de produção**. Disponível em: <http://www.portalunica.com.br/portalunica>. Acesso em: 10 set. 2008.

_____. **Setor Sucroenergético – Histórico**. Disponível em: <http://www.unica.com.br> Acesso em: 23 jun. 2011.

VIANA, B.A. **Tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica**. 2006. 88f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2006.

WADT, L.C. **Cultivo de *Pleurotus ssp.* em vinhaça visando a produção de biomassa e exopolissacarídeos**. 2008, 72f. Dissertação (Mestrado em Biologia na Agricultura e Ambiente), Universidade de São Paulo - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2008.