**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Impactos da Estocagem de Vinhaça e
das Águas de Lavagem da Cana-de-Açúcar
nos Domínios do Aquífero Bauru-Dobrada-São Paulo**

José Antonio Beltrão Sabadia

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Area de Concentração: Recursos Minerais e Hidrogeologia

**SÃO PAULO
1994**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005588

Impactos da Estocagem de Vinhaça e
das Águas de Lavagem da Cana-de-Açúcar
nos Domínios do Aquífero Bauru-Dobrada-São Paulo

José Antonio Beltrão Sabadia

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Área de Concentração: Recursos Minerais e Hidrogeologia

COMISSÃO JULGADORA

	nome
Presidente:	<u>Dr. A. da C. Rebouças</u>
Examinadores:	<u>Dr^a D. C. P. Casarini</u>
	<u>Dr. C. C. do A. e Silva</u>

ass.

[Signature]
[Signature]
[Signature]

SÃO PAULO
1994

X

P'ra Queca, Bibiu, Ihvinha e Victor

SUMARIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
I. INTRODUÇÃO.....	01
I.1 Objetivos.....	04
I.2 Localização e Acesso.....	06
I.3 Contexto Climatológico.....	08
I.4 Contexto Geomorfológico.....	09
I.5 Aspectos Legais.....	10
II. METODOLOGIA DE TRABALHO.....	13
II.1 Levantamentos Bibliográficos.....	14
II.2 Implantação dos Piezômetros Multiníveis.....	15
II.3 Testes de Condutividade Hidráulica.....	23
II.4 Levantamento Plani-altimétrico e Potenciometria.....	29
II.5 Coleta e Análise Físico-química de Amostras.....	30
II.5.1 Aguas de Lavagem da Cana-de-Açúcar.....	33
II.5.2 Vinhaça.....	34
II.5.3 Aguas Subterrâneas.....	34
II.5.4 Aguas Superficiais.....	36
II.6 Coleta e Análise Granulométrica de Amostras.....	37

III. ESTADO DA ARTE.....	39
IV. GEOLOGIA REGIONAL.....	44
IV.2 Estratigrafia.....	46
IV.2.1 Formação Adamantina.....	46
IV.2.1.1 Unidade BM-1.....	46
IV.2.1.2 Unidade BM-2.....	48
V. HIDROGEOLOGIA REGIONAL.....	49
V.1 Características Hidrodinâmicas.....	49
V.2 Características das Águas.....	51
V.3 Vulnerabilidade	52
VI. APRESENTAÇÃO, DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS.....	55
VI.1 Caracterização e Modo de Disposição dos Efluentes.....	55
VI.1.2 Águas de Lavagem da Cana-de-Açúcar.....	56
VI.1.3 Vinhaça.....	60
VI.2 Quadro Geológico Local.....	65
VI.2.1 Análises Granulométricas.....	66
VI.3 Avaliação de Condutividade Hidráulica.....	69
VI.3.1 Determinação de Condutividade Hidráulica.....	75
VI.4 Relações Potenciométricas Águas Subterrâneas/Águas Superficiais.....	79
VI.5 Qualidade Físico-Química das Águas Subterrâneas.....	85
VI.6 Qualidade Físico-Química das Águas Superficiais.....	105
VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
VIII. CONCLUSÕES.....	113

X

IX.BIBLIOGRAFIA.....	116
----------------------	-----

RESUMO

O presente trabalho apresenta os resultados do monitoramento realizado numa área de aproximadamente 21 km², no Município de Dobrada, centro oeste do Estado de São Paulo, onde foram avaliados os impactos produzidos nas águas subterrâneas e superficiais decorrentes da infiltração e percolação dos efluentes vinhaça e águas de lavagem da cana de açúcar, a partir de lagoas escavadas de acumulação e células/tanques de decantação, respectivamente, nos domínios do Aquífero Bauru (Cretáceo).

O Aquífero Bauru, livre e poroso, ocorre em uma extensão total aflorante de 104.000 km², considerando-se somente o Estado de São Paulo, suportando uma demanda atual superior a 15.000 poços com intensa utilização doméstica e industrial.

Para as águas subterrâneas, o manganês (entre 0,03 e 3,5 mg/l), o ferro (entre 0,45 e 34 mg/l), o alumínio (entre 1 e 52 mg/l) e o fosfato (entre 0,03 e 0,38 mg/l), ultrapassaram os valores para consumo humano referidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS); Decreto nº 12.486 de 20/10/78, NTA-60, para o Estado de São Paulo e Resolução CONAMA nº 20 de 18/06/86.

Em relação as águas superficiais, os valores de ferro total (3 mg/l) e fosfato (0,035 mg/l), ultrapassaram os padrões de potabilidade para consumo humano relatados pela mesmas referências acima citadas, porém, em valores bem abaixo dos registrados para as águas subterrâneas impactadas.

Esta pesquisa pretendeu estabelecer um aprimoramento dos

métodos utilizados para a caracterização dos impactos gerados com a infiltração e percolação dos efluentes considerados, destacando as interrelações águas subterrâneas/águas superficiais, com o objetivo de prover maiores subsídios à legislação de proteção dos corpos hídricos.

ABSTRACT

This work shows the results of a monitoring carried out in a area of about 21 km², Dobrada Municipality, Central West region of the state of São Paulo, where the impacts in groundwater and surface water were evaluated by the infiltration and percolation of vinasse and water used for washing cane sugar, through accumulation ponds and decantation reservoirs, respectively, in areas of Bauru Aquifer (Cretaceous).

The Bauru Aquifer, free and porous, occurs in a extended area of 104.000 km² in São Paulo State, as a major exploitable aquifer (more than 15.000 wells), used for domestic and industrial water supplies.

For the groundwater, the following measures were found in analyses exceeding drinking water standards: manganese (0,03 to 3,5 mg/l), iron (0,45 to 34 mg/l), aluminum (1 to 52 mg/l) and phosphate (0,03 to 0,38 mg/l).

For superficial water, the following measures exceeded drinking water standards: total iron (3 mg/l) and phosphate (0,035 mg/l).

The main purpose of this research is to improve the field methodology to characterize the impacts of vinasse and washing water of cane sugar infiltration/percolation, detaching the relationship between ground and surface water, with the major aim

to supply the legislation to protect the drinking water resources.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho tornou-se possível devido a colaborações incisivas e decisivas de diversas pessoas, entidades e instituições, as quais o autor externa a sua mais sincera gratidão.

Ao professor Dr. Aldo da Cunha Rebouças, Diretor do Centro de Pesquisas de Aguas Subterrâneas do Instituto de Geociências - CEPAS/IGUSP, pela orientação durante todo o trabalho e por possibilitar a obtenção dos recursos para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Dr. Uriel Duarte do Centro de Pesquisas de Aguas Subterrâneas - CEPAS/IGUSP, pelo constante estímulo, apoio e amizade.

Ao Engg. Rodrigo César de A. Cunha, Gerente do Setor de Pesquisa de Resíduos Industriais da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, por possibilitar a utilização da infraestrutura laboratorial da companhia.

A Destilaria Lagoa Dourada S/A, na pessoa do Engg. Eduardo Ieda, Gerente Industrial, por possibilitar a instalação do sistema de monitoramento e, em especial, ao Agrimensor Jáder A. Formici e a Luis Eduardo pela ajuda nos trabalhos de campo e realização do levantamento planialtimétrico.

Ao senhor Antonio Alves da Silva pelo apoio e experiência no desenvolvimento de todo o trabalho de campo.

Ao Geólogo MsC. Renato Blat Migliorini pela ajuda nas campanhas de coleta de amostras e avaliações hidrodinâmicas em campo.

A Mineração Assessoria e Planejamento LTDA - MINING, através de seus Diretores, Geólogo Antonio Elisio de Sousa e Geólogo José Amaral Monteiro e do Geólogo José Gecivaldo Maciel pela disposição e considerações permanentes e por permitirem a utilização da infraestrutura da empresa.

Aos professores (as) Doutores (as) Alberto Pacheco, Annkarin Aurelia Kimmelman e Silva, José Milton Benetti, Maria Szikszay, Nelson Ellert e Robert W. Cleary, pela disponibilidade para esclarecimentos e troca de idéias.

Ao Geólogo Seiju Hassuda pela indicação e cessão de grande parte da bibliografia.

As famílias Weissberg e Menegasse Velasquez, pela amizade, incentivo e apoio irrestritos.

Ao desenhista Paulo Ricardo de Sousa pelo trabalho de desenho.

A Arquiteta MsC. Vera Blat Migliorini e ao Coral do Museu Lasar Segal por me permitirem solfejar em São Paulo.

Aos amigos Geólogos MsC. Francisco Pinheiro Lima Filho e Cláudio Florêncio Pires por todo o apoio e por terem me proporcionado as melhores lembranças dos tempos de CRUSP.

Aos amigos Pós-graduandos, Leila N. Menegasse, Iara Weissberg, Maria A. P. B. Neta, Renato Blat Migliorini, Gisela Alexandre, Carlos Rodas, Marcos Antonio Mattiusso Marques e Everton de Oliveira, pelo incentivo e discussões.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, professores e funcionários do Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada e do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, em especial à Dona Lourdes Marques, Dona Lúcia Tardelli e ao Senhor Walter Leite, pela acolhida sincera e excelente ambiente de trabalho.

A Chefe da Sessão de Pós-Graduação (IGUSP), Maria Madalena Benzi Matazo Ventura, pela cordial atenção em todos os momentos.

A Cristiana de Souza Parente.

A Universidade Federal do Ceará pelas passagens aéreas e liberação para as defesas (Qualificação e Dissertação) e ao Departamento de Geologia pelo apoio e à bolsista de graduação em geologia Diolande F. Gomes, pela ajuda nas análises granulométricas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01:	Mapa de Localização e Acesso - Destilaria Lagoa Dourada S/A - Dobrada (SP).....	7
Figura 02:	Esquema de Instalação do Piezômetro 01 (Pz ₁₁ e Pz ₁₂).....	20
Figura 03:	Esquema de Instalação dos Piezômetros 02 (Pz ₂₁ e Pz ₂₂), 03 (Pz ₃₁ e Pz ₃₂) e 04 (Pz ₄₁ e Pz ₄₂).....	21
Figura 04:	Mapa de Localização dos Pontos de Amostragem para as Águas Subterrâneas.....	22
Figura 05:	Obtenção dos Coeficientes de Condutividade Hidráulica Através do Método "Slug Test" (Hvorslev, 1951 in: Guiger Jr., 1987).....	27
Figura 06:	Mapa de Situação dos Pontos de Amostragem.....	32
Figura 07:	Estratigrafia do Grupo Bauru (Brandt Neto, 1984)....	45
Figura 08:	Esquema Conceitual de Risco de Poluição para a Água Subterrânea (Foster, 1987).....	54
Figura 09:	Histogramas de Distribuição das Classes Granulométricas para as Amostras de 1,5 a 2 metros Relativas as Sondagens 1, 2, 3 e 4 para a Instalação dos Piezômetros Respetivos (Escala de Wentworth, 1922).....	68
Figura 10:	Efeito da Densidade na Migração de uma Solução Contaminante Sob Fluxo Uniforme; (A) pouco mais denso que a água subterrânea; (B) intermediário e (C) grande contraste de densidade (Freeze and Cherry, 1979 in: Cleary, 1989).....	74
Figura 11:	Mapa Potenciométrico Local da Área Estudada.....	81
Figura 12:	Perfil Potenciométrico Mostrando o Impacto da Infiltração Induzida dos Efluentes no Nível Freático Local.....	82
Figura 13:	Diagrama Mostrando as Linhas de Fluxos por Efeito da Recarga Induzida (Infiltração) em Superfície Freática Inclinada (M. Deutch in: Cleary, 1989).....	84
Figura 14:	Diagrama de Análise d'Água de Piper para as Águas Subterrâneas de "Background" para Este Trabalho (1) e para o Trabalho de Hassuda, 1989 (2). Ambas	

Cloretadas Cálcicas (Aqüífero Bauru).....87

Figura 15: Evolução Físico-Química para as Águas Amostradas no Sistema Piezométrico Sob Efeito da Infiltração dos Efluentes Considerados. Pz₁₁, Pz₂₁, Pz₂₂, Pz₄₁, Pz₄₂: bicarbonatadas cálcicas e magnesianas; Pz₃₁ e Pz₃₂: bicarbonatadas sódicas e Pz₁₂: cloretada cálcica e magnesiana.....92

Figura 16: Representação Esquemática das Várias Opções de Disposição Agrícola da Vinhaça (Glória e Orlando Filho, 1982).....112

LISTA DE TABELAS

Tabela 01:	Profundidade de Instalação dos Piezômetros com Dois Níveis - Destilaria Lagoa Dourada - Dobrada - São Paulo.....	16
Tabela 02:	Percentual de Áreas de Ocorrência do Aquífero Bauru em Função das Espessuras das Zonas Não Saturadas para o Estado de São Paulo (Hirata et al., 1970 - Modif.)..	55
Tabela 03:	Características Médias das Águas de Lavagem da Cana da Usina Ester, Cosmópolis - SP, in: Hespanhol, 1979).....	58
Tabela 04:	Composição Química da Vinhaça de Mostos Distintos, Segundo Diversos Autores.....	63
Tabela 05:	Viscosidades da Água Pura em Função de Diferentes Temperaturas (Perry, 1958 in: Custodio e Llamas, 1983).....	72
Tabela 06:	Relação entre as Condutividades Hidráulicas (Método "Slug Test") e as Condutividades Elétricas das Águas Amostradas nos Diferentes Níveis Piezométricos.....	78
Tabela 07:	Dados Físico-Químicos das Amostras de Vinhaça, Águas de Lavagem da Cana, "Background" e Piezômetros.....	89
Tabela 08:	Parâmetros Químicos que Excederam Padrões de Potabilidade para a Água Subterrânea.....	90
Tabela 09:	Dados Físico-Químicos das Amostras de Vinhaça, Águas de Lavagem da Cana, "Background" e Riacho do Chimbó.....	107
Tabela 10:	Parâmetros Químicos que Excederam Padrões de Potabilidade para a Água Superficial.....	108

I. INTRODUÇÃO

Com a instalação dos primeiros engenhos de açúcar na segunda metade do século XVI, nasciam as unidades básicas de produção do Brasil Colonial, gerando, embora timidamente, os primeiros impactos ambientais pertinentes ao processamento da cana-de-açúcar.

A partir daí houve um crescente desenvolvimento do cultivo de cana em praticamente toda a costa do Brasil Colonial, motivado por condições favoráveis de clima e solo, trabalho escravo e latifúndio, constituindo um sistema conhecido como "*Plantation*", empresa de iniciativa privada, apoiada e incentivada pelo Estado.

A agroindústria da cana evoluiu a passos largos, historicamente fundamentada na produção principal de açúcar e eventualmente, álcool.

Em 1931, partindo-se da pressão dos Usineiros Nordestinos em busca de novos recursos, é criada a Comissão de Defesa da Produção do Açúcar (CPDA), com incentivos a produção de álcool, passando a vigorar o Decreto nº 19.717 que regulamenta a mistura de 5% de álcool na gasolina.

Com o propósito de estabelecer limites e cotas de produção para as diversas usinas, surge em 1933 o Instituto de Açúcar e do Alcool (IAA). A prioridade de produção e todos os conflitos gerados na determinação das cotas, envolviam basicamente, a produção de açúcar.

Em 1973, com a crise do petróleo promovida pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) sobem os preços dos insumos agrícolas e os custos de financiamentos para a instalação de destilarias anexas as usinas de açúcar.

Entretanto, no ano de 1975 é que a indústria sucro-alcooleira recebe seu grande impulso, movida fortemente pelo aprofundamento da crise energética mundial, quando o barril de petróleo subiu de US\$ 3 para US\$ 12, institucionalizando-se no País o Programa Nacional do Alcool (PRO-ALCOOL/Decreto nº 76.593, de 14/11/75), objetivando, principalmente, a geração de biocombustível automotivo.

Em 1975 a capacidade instalada no País para a produção de álcool anidro cresceu de 1,3 milhões de m³/ano (1974) para 3,8 milhões de m³/ano, trazendo com isso um forte comprometimento à preservação do meio-ambiente em função da geração do efluente denominado vinhaça, na proporção de 11 a 13 litros para cada litro de álcool produzido. Este efluente possui elevadas concentrações de matéria orgânica e outras substâncias inorgânicas que podem comprometer seriamente o meio-ambiente, tendo, a partir da safra 1979/1980, seu lançamento proibido, direta ou indiretamente, em qualquer coleção hídrica superficial, como regulamentam as portarias Minter nº 323, de 29/11/78 e Minter nº 158, de 03/11/80. Esta proibição deveu-se, principalmente, ao elevado índice de DBO característico da vinhaça (efeito catalizador da proliferação de microorganismos que esgotam o oxigênio dos corpos de águas superficiais).

De acordo com Rebouças et al (1986), a carga poluidora do efluente vinhaça produzida pelas destilarias de álcool (132

milhões de m³) durante a safra 1985/1986, tem efeito equivalente ao dos esgotos produzidos por uma população de 329 milhões de habitantes (2,5 vezes a população nacional do mesmo ano), admitindo-se a geração de 12 litros de efluente por litro de álcool produzido, DBO do efluente igual a 20g/litro, duração da safra de 150 dias e demanda equivalente de 54g DBO/habitante.dia.

Com a proibição de lançamento direto ou indireto em qualquer corpo hídrico superficial, são fortalecidas as opções de descarte de vinhaça como fertilizante na forma "in natura" (fertirrigação), fundamentada na sua equivalência em relação aos fertilizantes tradicionais, como também os despejos em "áreas de sacrifício", favorecendo-se a infiltração no solo através de sulcos de escarificações e disposições em tanques escavados (lagoas) também nos solos. A utilização dos solos como elemento de transferência da carga poluidora da vinhaça motivou a realização de vários experimentos, desde meados de 1985 até hoje, basicamente realizados pelo CEPAS-IG-USP e CETESB, buscando-se dimensionar a influência dos diversos tipos de disposição da vinhaça na qualidade das águas subterrâneas e subsidiar tecnicamente a elaboração de normas de disposição, construção de canais de repasse e tanques (lagoas) de armazenamento deste efluente no Estado de São Paulo.

Segundo os dados de Hassuda (1989), foram produzidos no Brasil em 1986 cerca de 11 milhões de m³ de álcool, gerando, concomitantemente 132 milhões de m³ de vinhaça. Para o ano seguinte (safra 1986/1987) houve um decréscimo de aproximadamente 01 milhão de m³, tendo as safras subseqüentes apresentado produções gradativamente superiores, atingindo em 1992 o volume

de 11,7 milhões de m³ de álcool, responsáveis pela geração de aproximadamente 140 milhões de m³ de vinhaça.

O Estado de São Paulo responde hoje em dia por cerca de 70% da produção nacional, sendo detentor de um potencial poluidor incorporado a esta produção equivalente a aproximadamente 06 (seis) vezes a carga de esgotos produzidos por sua atual população.

De acordo com Hassuda (1989), encontram-se distribuídas no Estado de São Paulo 153 indústrias açúcar-alcooleiras com 43% deste total (61 indústrias) sobre os domínios do Aquífero Baurú (livre e poroso), funcionando como corpo de transferência do potencial poluidor do efluente vinhaça.

I.1 Objetivos

A presente pesquisa objetiva acompanhar o fluxo da infiltração e percolação da vinhaça nos domínios do Aquífero Baurú, partindo-se de tanques (lagos) de acumulação/armazenamento, para verificação dos impactos causados ao meio-ambiente, mais especificamente na qualidade das águas subterrâneas e superficiais da Região de Dobrada, centro-oeste do Estado de São Paulo.

Nas imediações da lagoa de acumulação de vinhaça escolhida há também tanques de decantação das águas de lavagem da cana (ALC), compondo um sistema de lavagem semi-fechado, onde também optamos por avaliar a possível infiltração e contribuição destas águas para a alteração da qualidade das águas locais. Apesar

deste referido tanque ser revestido de concreto, aventamos a possibilidade de ocorrência da infiltração.

Este trabalho pretende estabelecer um aprimoramento dos métodos utilizados para a caracterização dos impactos gerados pela infiltração do primeiro e do último efluente líquido oriundo do processo industrial da cana-de-açúcar, respectivamente, as águas de lavagem da cana (ALC) e vinhaça, buscando-se determinar as alterações físico-químicas produzidas nas águas subterrâneas e superficiais locais, bem como suas interrelações, com o objetivo de prover maiores subsídios à legislação de proteção dos corpos hídricos.

A região apresenta intensa atividade agro-industrial açúcar-alcooleira, repassando para o solo/subsolo as cargas potenciais poluidoras referentes aos efluentes produzidos.

O Aquífero Baurú ocorre em uma extensão total aflorante de 104.000 km² (considerando-se somente o Estado de São Paulo), compondo um pacote sedimentar de comportamento livre (não confinado) em praticamente toda a sua área de ocorrência, suportando atualmente uma demanda superior a 15 mil poços produtores (Hassuda, 1989), responsáveis em grande parte pelo abastecimento hídrico da Região Oeste do Estado de São Paulo, com intensa utilização doméstica e industrial, merecendo, portanto, uma atenção legislativa eficiente e capaz de resguardar a qualidade natural do recurso.

I.2 Localização e Acesso

Os tanques envolvidos no presente trabalho pertencem a Destilaria Lagoa Dourada S.A. (Fazenda do Chimbó - Grupo Miori S.A.), estando localizados no Município de Dobrada, Centro Norte do Estado de São Paulo, a praticamente 320 km da Cidade de São Paulo.

O Acesso, partindo-se da capital paulistana, dá-se pela Rodovia Anhanguera até o encontro com a Rodovia Washington Luiz (aproximadamente 155 km), onde tomamos à esquerda no sentido de São Carlos, Araraquara e Matão, por cerca de 159 km até o trevo do quilômetro 314, onde dobramos à direita e seguimos por mais 06 km, em estrada de terra batida (vicinal carroçável entre os canaviais), até alcançarmos a destilaria, perfazendo um total de 320 km (Figura 01).

Os tanques foram escavados/construídos na Bacia Hidrográfica do Riacho do Chimbó (oeste da Cidade de Dobrada), afluente do Córrego do Marimbondo, que por sua vez, deságua no Rio São Lourenço na Região do Médio Tietê.

A pesquisa contempla uma área aproximada de 21 km² inserida entre os paralelos 21° 31' 19" e 21° 33' 14" de latitude sul e os meridianos 48° 26' 12" e 48° 29' 18" de longitude oeste.

FIGURA 01: Mapa de Localização e Acesso -- Destilaria Lagoa Dourada S/A - Dobrada (SP).

I.3 Contexto Climatológico

O oeste do Estado de São Paulo é caracterizado climatologicamente como uma zona transicional, apresentando variações entre o clima tropical e o sub-tropical, ou seja, entre o úmido e o seco, respectivamente. Nos dois tipos climatológicos o verão responde pela estação de grande pluviosidade e o inverno corresponde ao período relativamente mais seco.

Adotando-se a classificação de Köppen temos os tipos Aw, representando o clima tropical com bastante chuva, e o Cwa subtropical, sub-úmido, de características diferentes, temperado quente, com grande pluviosidade (média mensal entre 150 a 200 mm) e longo período de estiagem (DAEE, 1972; 1976; 1979).

A temperatura média regional oscila de 22 a 23°C, estando as temperaturas médias mínimas variando entre 11 e 13°C. O mês mais quente (janeiro) atinge o valor máximo de 31°C (DAEE, 1976; 1979).

Os valores médios anuais totais de chuva encontram-se entre 1300 e 1500 mm e a evaporação real (EVR), calculada da região, mostra valor médio de 750 mm/ano. Os valores da evaporação potencial (EVP) anual foram estimados em 2000 mm (+/-12%), reduzindo-se a valores mínimos, da ordem de 1850 mm, nos locais mais elevados em função de um índice maior de pluviosidade. A evaporação real atinge valores máximos nos dias posteriores a um período de chuvas, circunstância onde a disponibilidade de água é maior, podendo a evaporação real aproximar-se da potencial. Nos períodos contínuos de seca, com

baixa quantidade de água disponível, os valores da evaporação real são mínimos (DAEE, 1976; 1979).

I.4 Contexto Geomorfológico

A Região Centro-Norte do Estado de São Paulo constitui-se em uma área de predominante ocorrência dos sedimentos do Grupo Baurú. Almeida (1964), refere-se ao "Planalto de Monte Alto", definido entre as Cidades de Taquaritinga, Traiúva e Santa Adélia, como a região de maior destaque dentro do Planalto Ocidental do Estado de São Paulo (altitude máxima de 750 metros), representando regionalmente núcleos de proliferação de drenagens que demandam as bacias hidrográficas circunvizinhas maiores (Mogi-Guaçu/Pardo, Tietê e Turvo).

Pró-Minério (1981a), considera para a região a subdivisão geomorfológica dos sedimentos do Grupo Baurú em três zonas, a seguir: o "Planalto de Monte Alto", o "Planalto da Catanduva" e as "Áreas Indivisas", estas últimas compondo a maior parte da área em questão. O "Planalto de Monte Alto" coincide com a delimitação de Almeida (Op.Cit.), ficando a Serra de Itambé compondo estruturalmente o "Planalto da Catanduva".

De acordo com Brand Neto (1984), a porosidade diferenciada do pacote sedimentar Baurú, em função da intensa cimentação carbonática de alguns arenitos, concorre de maneira a produzir mudanças no padrão de distribuição das drenagens, como também a promover diferenciações topográficas.

Localmente a configuração geomorfológica é suave,

predominando um relevo de formas onduladas, abrandadas/favorecidas ainda pela intensa ocupação agrícola dos morrotes que se apresentam recobertos pelos extensos canaviais.

1.3 Aspectos Legais

A preocupação brasileira com a proteção/conservação dos recursos hídricos não é recente, resguardando-se as devidas proporções no que tange a avaliação de risco ambiental. Assim sendo, o Código de Águas de 1934, dispõe em seu artigo 98, que são proibidas construções capazes de poluir ou que venham a inutilizar para uso ordinário as águas de poços ou nascentes. As normas de proteção são tratadas à época, encontrando-se longe dos princípios de gestão internacionalmente hoje aceitos.

Vale destacar, que já no artigo 110 do mesmo código, identifica-se uma regra de responsabilidade civil e criminal (Granziera, 1993), em caso de poluição hídrica, conforme segue:

"Artigo 110 - Os trabalhos para a salubridade das águas serão executadas à custa dos infratores, que, além da responsabilidade criminal, se houver, responderão pelas perdas e danos que causarem e pelas multas que lhes forem impostas nos regulamentos administrativos".

E também digno de atenção o Decreto No 23.777, de 23/01/34, anterior ao Código de Águas, de acordo com Pompeu (1976), onde ficava estabelecida a obrigatoriedade do lançamento dos efluentes industriais das usinas açucareiras nos rios principais, longe das margens, em lugar fundo e correntoso,

devendo, quando isso não fosse possível, ser adotado o sistema de depuração em tanques.

Posteriormente ao Código de Águas, muitos outros diplomas legais foram surgindo objetivando a proteção dos recursos hídricos no Brasil, embora quase sempre descuidadas da necessária acuidade técnica multidisciplinar clara e específica, que pudesse respaldar a adoção de regras e ações de proteção/conservação ambientais sensatos e eficientes.

Até o ano de 1978 os efluentes líquidos gerados nas usinas de açúcar e destilarias de álcool eram despejados diretamente nos cursos d'água superficiais. A partir da safra 1979/1980, fundamentado principalmente nos elevados índices de DBO característico da vinhaça e das águas de lavagem de cana (apesar destas últimas apresentarem descartes eventuais), esses efluentes tiveram seus lançamentos proibidos, direta ou indiretamente, em qualquer manancial hídrico superficial, como regulamentam as portarias MINTER Nº 323 de 29/11/78 e MINTER Nº 158, de 03/11/80. Com esta proibição ficaram potencializadas as opções de descarte da vinhaça "in natura" para irrigar e adubar (fertirrigação), corroboradas pelas pesquisas agronômicas, como também as práticas de estimulação da infiltração do excedente nas chamadas "áreas de sacrifício" e, ainda, a alternativa de disposição em tanques/lagoas escavados.

A resolução CONAMA Nº 0002, de 05/06/84 (in: Hasssuda, 1989), definiu a realização de estudos e a apresentação de um projeto de resolução contendo normas para o controle de poluição causada pelos resíduos líquidos das destilarias de álcool e usinas de açúcar.

A partir de meados de 1985 foi dado início aos trabalhos de prospecção e monitoramento, encabeçados pelo CEPAS-IG-USP e apoiados pela CETESB, com o objetivo inédito de avaliar os impactos produzidos pela estimulação da infiltração da vinhaça em "áreas de sacrifício" na qualidade das águas subterrâneas, tendo como sede piloto a Região de Novo Horizonte.

A resolução CONAMA No 0001, passou a exigir, posteriormente em 23/01/86, a realização de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o respectivo Relatório de Impacto ao Meio-Ambiente (RIMA) para novas indústrias a serem instalados ou para qualquer ampliação efetivada nas unidades já existentes.

O Estado de São Paulo, por ser atualmente detentor de aproximadamente 70% da produção nacional de álcool e, portanto, por arcar com o ônus ambiental que este primeiro lugar de produção lhe impõe, criou a Lei No 6.134, de 02/06/88, regulamentada pelo Decreto No 32.955, de 07/02/91, onde, de acordo com o Artigo 14, "nenhuma atividade desenvolvida poderá poluir, de forma intencional ou não, as águas subterrâneas". Para tanto, consoante o Artigo 16 do citado decreto temos que: " Os resíduos sólidos, líquidos ou gasosos provenientes de qualquer atividade, somente poderão ser transportados ou lançados se não poluírem as águas subterrâneas."

Atualmente, tramita no Congresso Nacional o Projeto de Lei No 3.160, de 26/08/92, propondo a obrigatoriedade de realização de Auditorias Ambientais (Prática comum nos Estados Unidos e Europa e no Rio de Janeiro desde 26/11/91) nas indústrias, órgãos e empresas públicas e fundações.

As Auditorias Ambientais consistem basicamente em se

avaliar a gestão empresarial em relação ao meio-ambiente, determinando ativos e passivos ambientais, ou seja, diagnosticando o que a empresa já realizou em termos de meio-ambiente e o que resta para ser feito. Esta gestão ambientalista permitiria entender as especificidades dos condicionantes conflitivos de cada situação particular, possibilitando assim, uma mais fácil adequação das indústrias aos padrões legais de todas as fontes de poluição e comprometimento do meio ambiente, merecendo destaque o direito ao conhecimento das comunidades situadas em seu entorno, dos riscos a que estão submetidas.

O referido Projeto de Lei, em curso na Esfera Federal, traz, dentre outros objetivos, a prática de avaliação da maturidade ambiental da empresa em termos de uso racional, conservação e reutilização, com reciclagem de água de processo, tratamento ou disposição segura de resíduos sólidos, líquidos e gasosos.

II. METODOLOGIA DE TRABALHO

Da metodologia de trabalho constaram a pesquisa bibliográfica, abordando tópicos climatológicos, geomorfológicos, legais, criteriosa avaliação dos trabalhos prévios, geológicos, hidrogeológicos e hidrográficos; implantação de piezômetros multiníveis, para a compreensão dos regimes de fluxos horizontal e vertical, amostragem de água e realização de testes de campo para avaliação de condutividade hidráulica ("slug tests");

levantamentos planialtimétricos e potenciométricos locais e coleta de amostras e análises físico-químicas dos efluentes, sedimentos, águas subterrâneas e águas superficiais.

II.1 Levantamentos Bibliográficos

Foram levantados inicialmente os trabalhos relativos às aptidões agrícolas dos efluentes líquidos considerados que, ao longo dos anos, incrementaram um vasto acervo técnico que garantia as múltiplas melhorias da utilização "in natura" ou concentrada, principalmente de vinhaça, na qualidade dos sistemas produtivos de beneficiamento da cana-de-açúcar. Estes experimentos serviram de base para respaldar a melhor compreensão da dinâmica dos processos de infiltração nas posteriores pesquisas de controle ambiental.

Desenvolveu-se, em seguida, uma avaliação cuidadosa do conhecimento e da experiência acumulada na gestão dos problemas ambientais das indústrias açúcar-alcooleiras do Estado de São Paulo, buscando-se caracterizar o estado de arte, no que diz respeito aos experimentos e metodologias de campo que procuraram definir o comportamento dos constituintes da vinhaça e das águas de lavagem da cana nas zonas não saturada e saturada dos domínios aquíferos.

Procedeu-se, associadamente, um levantamento, a nível nacional e particularmente para o Estado de São Paulo, das instrumentações normativas e outros diplomas legais que regem as práticas de disposição dos efluentes aqui abordados.

As pesquisas bibliográficas juntaram-se também a geologia e hidrogeologia do Grupo Bauru, permitindo definir, em termos gerais, aspectos sedimentológicos e estratigráficos do pacote sedimentar, bem como avaliar os parâmetros hidrogeológicos e as potencialidades hídricas do meio aquífero na área de interesse e, conhecer a composição físico-química de suas águas.

Foi ainda realizado um levantamento bibliográfico morfoclimático e potamográfico que resultou na avaliação dos contextos climatológicos, geomorfológicos e hidrográficos da região circunvizinha à área considerada no Centro Norte do Estado de São Paulo.

II.2 Implantação dos Piezômetros Multiníveis

Os piezômetros foram instalados com o objetivo de compor o sistema de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, possibilitando a amostragem destas águas, bem como para compreensão do regime de fluxos horizontal e vertical (definição de direções de fluxos e de áreas de recarga e descarga) e para a avaliação da condutividade hidráulica local diretamente nos estratos aquíferos considerados, através de "slug test".

Os trabalhos foram iniciados no primeiro semestre de 1991, com a execução de sondagens teste com trado manual de 4", onde foi possível atingir 06 metros de profundidade, antevendo-se os problemas a serem enfrentados nas futuras perfurações e optando-se pela realização de sondagens rotativas com a perfuratriz SONDEQ - 60 M do Centro de Pesquisas de Águas

Subterrâneas - CEPAS - IG - USP.

Em setembro de 1991 foi dado início as perfurações, realizadas primeiramente com trado manual de 4" até aproximadamente 03 metros e efetivadas com sonda rotativa também em 4" até as profundidades desejadas e possíveis.

A profundidade desejada para os níveis piezométricos mais profundos, seria referente a cota de 522 metros, que representa a primeira entrada d'água do poço profundo de "background". Entretanto, as tomadas de pressão piezométricas dos níveis mais profundos alcançaram as cotas de 533, 532, 533 e 526 metros, correspondendo, respectivamente, aos níveis Pz₁₁, Pz₂₁, Pz₃₁ e Pz₄₁.

Os piezômetros foram dispostos a jusante dos locais de disposição dos efluentes, monitorando as alterações na qualidade da água subterrânea e a potenciometria local.

A opção de utilização de métodos geofísicos auxiliares para a disposição dos piezômetros (eletroresistividade e eletromagnético indutivo) foi descartada, em função do congestionamento de tubulações metálicas existentes na área e pelas dificuldades impostas com o relevo acidentado.

Foi executado um total de 58 metros de perfuração, ficando o furo 01 com 20 metros, o furo 02 com 17 metros, o furo 03 com 12 metros e o furo 04 com 09 metros.

Em seguida a conclusão de cada furo, foram montados os piezômetros com tubos de PVC de 3/4", rosqueados e tamponados nas extremidades, tendo os últimos 80 cm ranhurados com aberturas irregulares aproximadas de 2 mm, espaçadas de 2,5 cm e dispostas alternadamente de um lado e outro do tubo, sendo este espaço

posteriormente entelado com malha de nylon de 1,0 m², dobrada e fortemente amarrada com fio igualmente inerte.

Todos estes conjuntos foram previamente lavados com água de um poço profundo localizado a montante da área de instalação dos piezômetros.

O espaço anular entre o tubo de PVC e o furo foi preenchido com cascalho pré-lavado até, aproximadamente, 20 cm acima do início das ranhuras, servindo como pré-filtro. Por sobre o material do pré-filtro foi recolocado parte do material retirado do próprio furo durante a perfuração, tendo-se o cuidado de isolar o primeiro piezômetro com um selo de bentonita na porção intermediária do material reposto. Acima desta composição instalou-se um segundo piezômetro com as mesmas características, tendo também seu espaço anular preenchido por cascalho pré-lavado e completado com parte do material retirado do próprio furo até a superfície.

Este procedimento descrito anteriormente foi comum a instalação dos quatros piezômetros de dois níveis realizados.

As profundidades atingidas pelas tomadas de pressão dos piezômetros ficaram assim identificadas e relacionadas (TABELA 01):

PIEZOMETRO 01	-	Pz ₁₁ Pz ₁₂	20 metros 10 metros
PIEZOMETRO 02	-	Pz ₂₁ Pz ₂₂	17 metros 06 metros
PIEZOMETRO 03	-	Pz ₃₁ Pz ₃₂	12 metros 06 metros
PIEZOMETRO 04	-	Pz ₄₁ Pz ₄₂	09 metros 05 metros

TABELA 01 : Profundidade de instalação dos piezômetros com dois níveis - Destilaria Lagoa Dourada - Dobrada - São Paulo.

Como complementação, os piezômetros foram envoltos com tubo de PVC de 5 1/2" e receberam uma laje de proteção de concreto com a finalidade de selo.

Em função do pesado tráfego de caminhões tanques na área próxima a execução do piezômetro 01, optou-se pela construção de uma caixa de concreto rebaixada ao nível do solo e tampada com chapa de aço de 1/2 cm (FIGURA 02), objetivando-se garantir a integridade do piezômetro e não dificultar as operações de manobra dos veículos que, acessam o local para o abastecimento de vinhaça para fertirrigação.

Os piezômetros 02, 03 e 04, dispostos em locais fisicamente menos vulneráveis, foram complementados com um tubo de PVC de 5 1/2" bem destacado do terreno e protegidos lateralmente por mourões de concreto armado (FIGURA 03).

O piezômetro 01 (Pz₁₁ e Pz₁₂) ficou localizado na cota mais baixa do entorno do tanque principal de vinhaça e, portanto,

a jusante deste, recebendo influência e gerando informações sobre o modelo de infiltração para vinhaça.

O piezômetro 02 (Pz₂₁ e Pz₂₂) localiza-se na menor cota de entorno dos tanques de operação de lavagem da cana, a jusante destes, sendo responsável pelas informações de fluxo e monitoramento da qualidade das águas subterrâneas em função da infiltração das águas de lavagem da cana-de-açúcar.

O piezômetro 03 (Pz₃₁ e Pz₃₂) tem os piezômetros 01 e 02 dispostos a montante, estando localizado na mais baixa cota adjacente ao tanque alternativo para os despejos líquidos eventuais das águas de lavagem da cana e como opção de segurança para vinhaça, monitorando assim os fluxos e as alterações da qualidade das águas subterrâneas influenciadas pela percolação de vinhaça e águas de lavagem da cana.

Já o piezômetro 04 situa-se a aproximadamente 750 metros a jusante do piezômetro 03, operando na margem direita do Riacho do Chimbó, dentro da mata de proteção do curso d'água, sendo responsável pelo entendimento das interações águas subterrâneas/águas superficiais e monitorando as alterações de qualidade das águas subterrâneas em função da circulação dos efluentes considerados.

A distribuição geral dos piezômetros pode ser avaliada na Figura 04, compondo o Mapa de Localização dos Pontos de Amostragem para as Águas Subterrâneas.

FIGURA 02: Esquema de Instalação do Piezômetro 01 (Pz₁₁ & Pz₁₂).

FIGURA 03: Esquema de Instalação dos Piezômetros 02 (Pz₂₁ & Pz₂₂), 03 (Pz₃₁ & Pz₃₂) e 04 (Pz₄₁ & Pz₄₂).

FIGURA 04: Mapa de Localização dos Pontos de Amostragem para as Águas Subterrâneas.

II.3 Testes de Condutividade Hidráulica

No caso da realização de trabalhos compreendendo a avaliação de poluição das águas subterrâneas, é de fundamental importância o conhecimento dos condicionantes hidrogeológicos do meio. Assim sendo, buscou-se neste estudo determinar as condutividades hidráulicas e a potenciometria do aquífero Bauru na área imediata sob influência das fontes poluidoras, obtendo-se um mapa de fluxo local e as ordens de valores para as velocidades de percolação.

Os testes para a determinação de condutividade hidráulica podem ser realizados "in situ" ou, através de ensaios de laboratório com amostra não deformada do material aquífero por meio de permeâmetros que, podem ser de carga constante ou de carga variada.

Optou-se pela realização de um método da variação instantânea de carga hidráulica conhecido como "slug test", em função da necessidade de não se produzir grandes perturbações de fluxo e, portanto, não modificando a qualidade das águas subterrâneas locais, fato comum aos tradicionais ensaios de bombeamento de poços e, também por constituírem estes últimos uma opção mais demorada e cara.

O "slug test" consiste na alteração instantânea da carga hidráulica por introdução ou retirada de uma quantidade de água no poço ou piezômetro, causando uma elevação ou rebaixamento do nível d'água dentro destes, tendo-se o cuidado posterior de monitorar a descida ou subida dos níveis em função do tempo. Este

mesmo efeito pode ser obtido pela introdução de um cilindro com um determinado volume dentro do poço ou piezômetro considerado.

Os testes para avaliação de condutividade hidráulica segundo o método "slug test" devem ser encarados como geradores de ordem de grandeza, fornecendo dados não totalmente precisos (valores não absolutos), porém, sendo indicados para locais onde deseja-se conhecer as características hidrogeológicas do material e, segundo Hvorslev, (1951) in: Guiger Jr., (1987) :

- a) não haja condição de obter-se amostras indeformadas;
- b) não seja recomendável a realização de testes de bombeamento/injeção de água, quer seja para não perturbar as características pontuais de fluxo e, portanto, a qualidade das águas subterrâneas, quer seja por imposições físicas como o diâmetro do poço, por exemplo;
- c) os poços existentes mostram espessuras de lâmina d'água inferior a 10 (dez) metros e pequeno diâmetro do tubo de revestimento (menores que seis polegadas).

Hvorslev (1951, in: Guiguer Jr., 1987), apresentou a seguinte fórmula geral que governa a resposta de um poço ou piezômetro de observação, considerando o meio homogêneo, isotrópico, infinito e incompressível (água e aquífero), para a variação instantânea do nível d'água dentro destes:

$$F.K.(H - h) = \pi \cdot r_e^2 \frac{dh}{dt} \quad (II.1)$$

onde (notação de Freeze e Cherry, 1979, in: Guiger Jr., 1987):

F - "fator de forma", dependendo da geometria construtiva do poço (piezômetro) e do furo, e que constitui o "raio efetivo" no qual ocorre o fluxo;

K - condutividade hidráulica do meio relativa ao "raio efetivo";

H - carga hidráulica do nível estático;

h - carga hidráulica dentro do piezômetro (poço) no tempo t ;

r_e - raio da tubulação do piezômetro (poço).

A equação (II.1) pode ser entendida como representativa da relação entre a taxa de variação da quantidade de água dentro da tubulação do poço/piezômetro (lado direito), e o fluxo volumétrico de Darcy dentro do raio efetivo do poço/piezômetro, medido do eixo do furo até o limite do pré-filtro com a formação (lado esquerdo).

Reescrevendo-se a equação (II.1) como:

$$H - h = \frac{\pi \cdot r_w^2}{F \cdot K} \frac{dh}{dt} \quad (II.2)$$

e, definindo-se $\pi \cdot r_w^2 / F \cdot k$ como o tempo básico de resposta ou t_o , tem-se:

$$H - h = T_o \frac{dh}{dt} \quad (II.3)$$

A solução para a equação diferencial parcial ordinária (II.3), com condição inicial $h = H_o$ em $t = 0$, representando H_o a variação inicial do nível d'água dentro do poço/piezômetro é:

$$\frac{H - h}{H - H_o} = e^{-t/t_o} \quad (II.4)$$

ou, ainda:

$$\ln \frac{H - h}{H - H_o} = - \frac{t}{t_o} \quad (II.5)$$

Buscando-se a determinação de t_o faz-se $t/t_o = 1$, quando para $(H - h/H - H_o) = 0,37$, $\ln (H - h/H - H_o) = - 1$. Desta maneira, o tempo de resposta básico t_o pode ser determinado

quando os valores de $\ln (H - h/H - H_0)$ são plotados versus t (gráfico monolog), como a abcissa cuja ordenada seja 0,37, conforme ilustra a Figura 05. Por regressão linear obtém-se a reta média dos pontos.

Pela definição de t_0 , tem-se:

$$K = \frac{\pi r_w^2}{F \cdot t_0} \quad (11.6)$$

FIGURA 05: Obtenção dos Coeficientes de Condutividade Hidráulica Através do Método "Slug Test" (Hvorslev, 1951, in: Guiguer Jr., 1987).

Para um piezômetro/poço com entrada d'água (filtro) de comprimento l e raio r_w , com $l/r_w > 8$, Hvorslev (1951, in: Guiguer Jr., 1987), fornece o fator de forma, F , como:

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln(l/r_w)} \quad (II.7)$$

onde, substituindo-se (II.7) em (II.6):

$$K = \frac{rc^2 \cdot \ln(l/r_w)}{2 \cdot l \cdot t_0} \quad (II.8)$$

Hvorslev (1951, in: Guiguer Jr., op. cit.), dá ainda fórmulas para o fator F com outras configurações geométricas dos poços/piezômetros, e também para estes mesmos casos considerando o meio anisotrópico.

Foram realizados testes nos 08 (oito) piezômetros, consistindo o procedimento de campo na imersão de uma sonda de PVC tamponada de 1/2" no interior destes piezômetros (tubos de PVC de 3/4"), provocando deslocamentos volumétricos de 4,13 litros, onde, após reestabelecido o nível estático original, eram rapidamente retirados, tendo o retorno dos níveis d'água para o equilíbrio monitorado com um medidor de nível eletro-sonoro-luminoso, em função do tempo. Anotou-se o valor do nível mais baixo inicial para o tempo igual a zero e tomou-se valores da recuperação do nível a intervalos regulares de tempo, inicialmente mais curtos e, posteriormente, mais espaçados, em função da recuperação mais lenta na fase final do teste.

A título de regra prática de campo (Oliveira, 1992) acrescenta que os valores de nível d'água a serem acompanhados são aqueles que satisfaçam a condição:

$$0,1 < \frac{H - h}{H - H_0} < 1,0 \quad (II.9)$$

II.4 Levantamento Plani-altimétrico e Potenciometria

A área de interesse deste trabalho compõe parte da bacia hidrográfica do Riacho do Chimbó, apresentando relevo ondulado entre as cotas de 580 e 520 metros e mostrando-se um pouco mais acidentada somente em função dos desníveis gerados antropicamente no setor de construção dos tanques/lagoas de disposição dos efluentes.

Tendo como base o levantamento planimétrico da Fazenda do Chimbó, realizado em escala 1:20.000, foram inicialmente plotados os quatro piezômetros de dois níveis construídos e o poço profundo que serviu de "background", bem como cadastrados os outros pontos de amostragem. Em seguida, com o objetivo de refinar a carta utilizada, foram realizados transporte de dados por sobreposição de parte da base planialtimétrica em escala 1:50.000 - Folha Matão - 1971 - IBGE, com o auxílio de um Aerosketchmaster Aus Jena do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - IG - USP.

Realizou-se, posteriormente, um nivelamento das cotas de todo o sistema de monitoramento das águas subterrâneas, sendo registrados em um mapa base.

No período de setembro de 1991 a agosto de 1992 foram feitas 03 (três) campanhas de medição dos níveis d'água dentro das tomadas de pressão dos piezômetros, com a utilização de um medidor de nível eletro-sonoro, ou luminoso que, juntamente com os dados potenciométricos do poço profundo de "background", possibilitaram entender as relações horizontais e verticais de caminhamento de fluxo, vindo a compor o mapa potenciométrico local da área considerada.

II.5 Coleta e Análise Físico-química de Amostras

Os efluentes vinhaça e águas de lavagem da cana-de-açúcar, assim como, as águas subterrâneas, representadas pelo poço profundo de "background" e os piezômetros instalados e o contexto águas superficiais, constituídas neste trabalho por uma represa e o Riacho do Chimbó, tiveram amostras coletadas para fins de análises físico-químicas no laboratório de Química Inorgânica da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, em São Paulo, com métodos de análise baseados na 17ª edição do "standard methods for the examination of water and wastewater" - APHA - AWWA - WPCF.

Estas 12 (doze) amostras foram analisadas segundo os seguintes parâmetros: sódio, potássio, magnésio, cálcio, manganês total, ferro total, alumínio total, cloreto, sulfato, fosfato, bicarbonato, carbonato, matéria orgânica total e pH.

Apenas a amostra da Represa da Guarita, por insuficiência dos volumes coletados, foi analisada segundo os parâmetros:

aluminio total, ferro total, manganês total e matéria orgânica total.

A Figura 06 mostra a distribuição geral dos pontos de amostragem.

Foram realizadas como rotina de campo 03 (três) campanhas de avaliação de condutividade elétrica, pH, temperatura, bicarbonato (HCO_3^-) e dióxido de carbono livre (CO_2), sendo efetivada a primeira após a instalação dos piezômetros, em setembro de 1991 e duas subseqüentes em agosto de 1992.

Figura 06: Mapa de Situação dos Pontos de Amostragem.

Estas análises compreenderam determinações em todo o contexto das águas superficiais (duas represas e o Riacho do Chimbó), nas águas subterrâneas (poço de "background" e piezômetros) e nos efluentes considerados (vinhaça e águas de lavagem da cana).

Os equipamentos utilizados para as determinações dos parâmetros em campo envolveram 02 (dois) estojos medidores de pH (Digimed), 02 (dois) condutivímetros (Digimed) e 02 (dois) "kits" para titulação e realização de método potenciométrico de avaliação dos valores para bicarbonato (HCO_3^-) e dióxido de carbono livre (CO_2), todos pertencentes ao Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS/IG/USP.

II.5.1 Águas de Lavagem da Cana-de-Açúcar

O sistema de operação de lavagem da cana na Destilaria Lagoa Dourada S.A. é do tipo semi-fechado, composto por três células/ tanques de concreto justapostos e interligados, onde a parte líquida do efluente circula livremente, ocorrendo a decantação da parte sólida do primeiro para o terceiro módulo. A amostra foi coletada no terceiro módulo-tanque, no momento de retorno da circulação e, portanto, o mais livre possível de materiais em suspensão. A amostra foi coletada em recipiente de polietileno de cinco litros, tendo sido "lavado" com o efluente por diversas vezes, sendo em seguida completamente cheio, lacrado, rotulado e preservado em gelo.

Tomou-se o cuidado de registrar o pH e a condutividade

elétrica da amostra, sendo conjuntamente encaminhados para o laboratório com a finalidade de servir de referência.

II.5.2 Vinhaça

A vinhaça constitui o efluente obtido como produto final da destilação do álcool etílico, sendo gerado continuamente na proporção aproximada de 11 a 13 litros para cada litro de álcool produzido.

Este efluente, no caso da Destilaria Lagoa Dourada S.A., é conduzida através de um canal de concreto com 1,0 metro de largura, diretamente para a lagoa/tanque principal de armazenamento/repasse, alcançando o referido tanque com aproximadamente 80°C de temperatura. A amostra foi coletada no momento de descarga no tanque, em recipiente de polietileno com capacidade para 05 (cinco) litros, tendo sido "lavado" por diversas vezes com o efluente, lacrado completamente cheio, rotulado e preservado em gelo.

A condutividade elétrica e o pH foram também medidos no momento da coleta e enviados como referência para as análises em laboratório.

II.5.3 Águas Subterrâneas

O sistema de monitoramento utilizado para as águas subterrâneas consiste dos quatro piezômetros de dois níveis

instalados e do poço profundo com trezentos metros que serviu de "background".

A água subterrânea do poço profundo, localizado a montante dos locais de disposição dos efluentes, representa a água subterrânea livre da influência do impacto destes efluentes. A amostra da água do poço foi coletada em regime de bombeamento, com o auxílio de um registro, que possibilitou lavar por diversas vezes o recipiente com 05(cinco) litros de capacidade, tendo sido posteriormente completamente cheio, lacrado, rotulado e preservado em gelo.

No caso dos piezômetros (tubos de PVC de 3/4"), foi utilizada uma bomba manual de vácuo, mangueiras de teflon com 1,0 cm de diâmetro e comprimentos variados e 02 (dois) erlemeyers de polietileno com capacidade para 1,0 litro.

Para a amostragem nos piezômetros adotou-se o procedimento de esgotamento imediatamente anterior a coleta, com o objetivo de evitar a amostragem de água estagnada. As amostras foram obtidas por bombeamento manual do sistema de vácuo, produzindo uma pressão negativa dentro do erlemeyer e transferindo a água do piezômetro, através da mangueira de teflon, para o próprio erlemeyer. A água amostrada era então utilizada para "lavar" por diversas vezes os recipientes de polietileno com capacidade de 1,0 litro cada, sendo necessário um número de 05 (cinco) frascos para cada piezômetro amostrado, tendo sido todos completamente cheios, lacrados, rotulados e preservados em gelo.

Os tubos individuais de polietileno com 1,0 litro foram utilizados para a coleta nos piezômetros, buscando-se evitar o tempo de demora na preservação das amostras, fato que certamente

ocorreria caso fossem utilizados recipientes com maiores volumes, lembrando a capacidade restrita a 1,0 litro dos erlemeyers. Este procedimento pretendeu otimizar a preservação e, portanto, a maior integridade físico-química das amostras, evitando-se trocas com os gases do recipiente não completamente cheio.

As águas dos piezômetros representam na verdade, as águas subterrâneas sob o impacto da infiltração e percolação dos efluentes considerados. Portanto, para cada nível potenciométrico amostrado, todo o sistema de coleta, incluindo erlemeyer, mangueiras, conexões, tubos, etc., era cuidadosamente lavados com água destilada, evitando-se assim possíveis contaminações e interferências.

Em todos os casos da amostragem das águas subterrâneas, tomou-se o cuidado de registrar os valores de pH e condutividade elétrica para cada amostra, sendo posteriormente encaminhados para balizar as análises de laboratório (referência).

II.5.4 Águas Superficiais

O sistema hídrico superficial monitorado representa parte da Bacia Hidrográfica do Riacho do Chimbó, sendo composto pela Represa da Guarita, Represa da Estrada e o próprio Riacho.

A Represa da Guarita, construída perpendicularmente ao eixo do Riacho do Chimbó, representa as águas superficiais a montante dos locais de disposição dos efluentes e, portanto, livre dos possíveis impactos da infiltração e percolação de vinhaça e águas de lavagem da cana. A amostra coletada ficou

restrita a 02 (dois) litros em frascos de polietileno, previamente lavados com a própria água represada, completamente cheios, lacrados, rotulados e preservados em gelo.

O Riacho do Chimbó teve suas águas coletadas no local de confluência com a ponte de madeira da estrada vicinal de acesso à destilaria, a cerca de 3,2 Km a jusante, em linha reta, dos locais de disposição dos efluentes. Foram coletados 05 (cinco) litros em recipiente único de polietileno, diversas vezes lavado com a água do próprio riacho, completamente cheio, tendo sido lacrado, rotulado e preservado em gelo.

Tanto a água coletada da Represa da Guarita, quanto a água do Riacho do Chimbó, tiveram os valores de pH e condutividade elétrica registrados e levados junto com as amostras ao laboratório como referência.

A Represa da Estrada localiza-se em uma cota topograficamente mais destacada que a área dos tanques de vinhaça e das águas de lavagem da cana, encontrando-se o seu canal de deságüe a jusante dos locais de disposição destes efluentes. Suas águas foram avaliadas em função do pH, condutividade elétrica, temperatura, bicarbonato (HCO_3^-) e dióxido de carbono livre (CO_2), todos realizados em campo.

II.6 Coleta e Análise Granulométrica de Amostras

Foram coletadas, quarteadas em campo, ensacadas, lacradas e rotuladas todo o material proveniente dos 58 metros das

sondagens executadas para a instalação dos piezômetros. Entretanto, optou-se pela análise granulométrica das amostras representativas das profundidades entre 1,5 e 2,0 metros de cada furo, pois, aproximadamente a partir desta espessura, os furos foram continuados com sondagem rotativa direta, utilizando lama bentonítica como fluido de circulação. Portanto, todo o material amostrado subjacente as profundidades acima citadas não mais representam os percentuais reais da distribuição granulométrica da formação aquífera perfurada.

As amostras consideradas foram submetidas a rotina para análise granulométrica do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará - UFC, em Fortaleza, sendo realizados ensaios de pipetagem em suspensão aquosa e peneiramento seco, obedecendo a escala de Wentworth (1922).

As análises foram realizadas de modo a fornecerem as distribuições estatísticas totais das frações granulométricas, caracterizando as predominâncias do material aquífero, os diâmetros efetivos e a qualidade da cimentação.

III. ESTADO DA ARTE

Os muitos trabalhos que versam sobre vinhaça encerram considerações físicas, químicas e biológicas com objetivos específicos de favorecimento de produtividade agrícola, respaldados na preconizada equivalência da vinhaça em relação aos fertilizantes tradicionais, melhorias de pH e da estrutura do solo, maior retenção de água, potencialização das reações de troca catiônica e benefícios em relação a população de microorganismos.

Esses trabalhos buscaram principalmente compreender o comportamento da vinhaça em relação ao nível de aproveitamento dos nutrientes pelas plantas e, embora realizados estritamente na dinâmica do solo agrícola (geralmente representando o primeiro metro da zona não saturada), permitiram respaldar as pesquisas posteriores relacionadas a gerência ambiental.

No caso das águas de lavagem da cana, os trabalhos existentes objetivaram, de igual maneira, quase sempre a otimização das características produtivas do sistema, com atenção voltada principalmente para a qualidade bacteriológica refletida no caldo e nos eventuais descartes para a irrigação.

As referências concernentes aos impactos causados pela vinhaça e águas de lavagem da cana dizem respeito basicamente aos corpos hídricos superficiais, em função principal dos elevados índices de DBO característicos. Apenas o levantamento realizado por Foundation de L'eau (1983 - in: Hassuda, 1989), faz um breve

diagnóstico dos impactos produzidos pela vinhaça nas águas subterrâneas.

A partir da safra 1979/1980, os descartes de vinhaça e águas de lavagem da cana ficaram proibidos, de forma direta ou indireta, em qualquer coleção hídrica superficial. Com essa proibição foram fortalecidas as práticas de utilização "in natura" da vinhaça na fertirrigação, estimulou-se a infiltração induzida nas "áreas de sacrifício" e foram ampliados os volumes dispostos em tanques escavados.

Em julho de 1985 são iniciados os trabalhos de prospecção e monitoramento, encabeçados pelo centro de pesquisas de águas subterrâneas - CEPAS - IG - USP e apoiados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, com o objetivo pioneiro de avaliar os efeitos produzidos pela estimulação da infiltração da vinhaça em "áreas de sacrifício", tendo como núcleo piloto a Usina São José da Estiva, localizada no Município de Novo Horizonte, nos domínios hidrogeológicos do Grupo Bauru. Estes estudos adotaram as seguintes etapas: investigação geofísica (eletroresistividade e eletromagnético indutivo), implantação de vinte piezômetros em tubo de PVC de 75 mm de diâmetro, estabelecimento da potenciometria hídrica local, coleta e análise físico-química da vinhaça, dos sedimentos na zona não saturada e da água subterrânea, ficando estabelecida uma metodologia de avaliação dos impactos sobre a qualidade das águas subterrâneas causados pela infiltração da vinhaça. Os resultados encontram-se publicados por Rebouças et al (1986), Mendes (1987), Hassuda (1989) e Hassuda, Rebouças e Cunha (1991).

Vale destacar que 06 (seis) parâmetros amostrados apresentaram concentrações acima dos padrões de potabilidade para consumo humano, a saber: o nitrogênio amoniacal, encontrado com valores entre $> 0,005$ e $9,8 \text{ mg/l}$; o magnésio, entre 12 e 21 mg/l ; o alumínio, entre $> 0,02$ e 23 mg/l ; o ferro, entre $> 0,005$ e 60 mg/l ; o manganês, entre 5 e 60 mg/l e o cloreto, entre 4 e 640 mg/l .

Cunha et al (1987), buscaram compreender a dinâmica na zona não saturada, dos constituintes potássio e nitrogênio, da vinhaça aspergida com canhão hidráulico (fertirrigação) nos domínios dos basaltos da formação Serra Geral na Região de plantio de cana-de-açúcar da Usina Costa Pinto em Piracicaba - São Paulo.

Este experimento monitorava a aplicação de vinhaça a uma taxa de $800 \text{ m}^3/\text{hectare}$, contendo $804,64 \text{ Kg}$ de potássio e $395,86 \text{ Kg}$ de nitrogênio, tendo um acompanhamento por tensiômetros e coletas de amostras da solução do solo através de lisímetros de sucção.

Os resultados do trabalho, restritos aos constituintes potássio e nitrogênio na zona não saturada, mostraram basicamente que, abaixo da profundidade de $1,2$ metros a transferência destes ions por lixiviação é muito baixa em função da absorção (consumo) pelas plantas dos elementos supracitados.

Gloeden et al (1991) publicaram preliminarmente os resultados do comportamento dos constituintes da vinhaça irrigada por caminhões tanques nas áreas de recarga (áreas de afloramento) do Aquífero Botucatu, Municípios de Serrana - São Paulo, dentro da zona de plantio de cana-de-açúcar da Usina da Pedra. Foram

selecionados 1.280 m², com declividade muito suave que, divididos em três domínios, recebiam vinhaça em taxas correspondentes a 0, 150 e 300 m³/hectare.

Inicialmente foram executados trabalhos de prospecção geofísica (eletroresistividade e eletromagnético indutivo), com a finalidade do prévio conhecimento do substrato (zonas saturada, não saturada e disposição das camadas geológicas), como também para garantir a integridade do meio a ser experimentado a partir de comparações com os valores obtidos de "background" para condutividade. Posteriormente deu-se a instalação de piezômetros multiníveis, tensiômetros, lisímetros de sucção e "pan-lisímetros", objetivando-se primeiramente, a coleta de uma série de amostras para análises químicas.

Embora de forma preliminar, os resultados obtidos indicaram que a aplicação da vinhaça como fertirrigação em solos e sedimentos permeáveis (áreas de afloramento/recarga do Aquífero Botucatu) põe em risco a qualidade das águas subterrâneas em relação aos seguintes parâmetros: cloreto, carbono orgânico, nitrogênio orgânico e amoniacal. O potássio, por sofrer adsorção pelo solo e absorção pela cana-de-açúcar, mostra-se difícil de ser conduzido para o aquífero.

Vale destacar que, como citado no próprio trabalho, o mecanismo da dispersão lateral provavelmente foi responsável pela homogeneização das concentrações nas três áreas supridas com diferentes taxas de irrigação. Assim sendo, deve-se considerar que as concentrações amostradas assumiram valores menores do que se poderia esperar para um experimento em situação real (relação área/espessura maior).

Hassuda et al (1991), reuniram o conhecimento e a experiência acumulada na gerência dos problemas ambientais das indústrias açúcar-alcooleiras no Estado de São Paulo, avaliando a influência dos vários tipos de disposição de vinhaça na qualidade das águas subterrâneas.

Foram então considerados os experimentos e metodologias de campo que procuraram definir o comportamento dos constituintes da vinhaça nas zonas não saturada e saturada do meio aquífero, tendo como base os trabalhos publicados por Rebouças et al (1986); Cunha et al (1987); Mendes (1987); Hassuda (1989); Hassuda, Rebouças e Cunha (1990); e Gloeden et al (1991).

Foi possível então concluir que a maneira de disposição de vinhaça nas chamadas "áreas de sacrifício" compromete a qualidade das águas subterrâneas, tendo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, acatado estas observações vindo a proibir a partir de 1988 este tipo de manejo.

A prática da fertirrigação é citada como o melhor meio de dispor vinhaça no solo, embora seja discutível a taxa de aplicação de 350 Kg de K_2O /hectare adotada atualmente para o Estado de São Paulo. Esta preocupação procede, por ser o potássio um elemento químico de fácil adsorção pelo solo e absorção pelas plantas, ou seja, não recomendado como referência para cálculo de taxas de aplicação para fins de contaminação das águas subterrâneas. E, também, em função dos diferentes domínios pedológicos existentes no Estado de São Paulo, que conseqüentemente, mostram-se com comportamentos físicos e químicos distintos, exigindo taxas de aplicação diferenciadas para cada contexto.

IV. GEOLOGIA REGIONAL

Os sedimentos que compreendem o "Grupo Bauru" passaram, desde sua identificação e denominação como "Gres de Bauru", por Gonzaga de Campos (1905), por diversas fases de estudo. Estas diferentes fases citadas proporcionaram à Unidade Bauru um amplo leque de considerações dentro da hierarquia estratigráfica, tais como: "Gres de Bauru", "Arenito Bauru", "Série Bauru", "Formação Bauru" e "Grupo Bauru", motivadas muitas vezes, pelas diferenças locais estudadas, ocasionando uma certa confusão no que diz respeito as nomenclaturas utilizadas.

Para o presente trabalho adotaremos a normalização desta nomenclatura como proposta por Brandt Neto (1984), corroboradas por seu próprio trabalho de 1977 com pequenas modificações de Suguio (1980), possibilitando a elevação da Unidade Bauru à categoria de grupo (Figura 07).

FIGURA 07: Estratigrafia do Grupo Bauru (Brandt Neto, 1984).

IV.1 Estratigrafia

No presente trabalho enfocaremos a Formação Adamantina, representante do grupo na área considerada, encontrando-se ausentes as unidades basais: Formações Caiuá e Santo Anastácio, assim como as Formações Iporá e Uberaba, e também a unidade de topo da seqüência, a Formação Marília, dentro da estratigrafia proposta por Brandt Neto (1984).

De acordo com o mesmo autor, a sedimentação Bauru processou-se no Cretáceo, avançando o limite com o Terciário e levando a deposição da fácies mais recente da Formação Marília.

IV.1.1 Formação Adamantina

Soares (1980), define a Formação Adamantina como constituída por repetições cíclicas de arenitos com abundantes estratificações cruzadas a maciços, com intercalações de siltitos e arenitos lamíticos.

Em consonância com o trabalho de Brandt Neto (1984) serão aqui também consideradas as subdivisões informais da Formação Adamantina nas unidades estratigráficas BM-1 e BM-2.

IV.1.1.1 Unidade BM-1

Constituem sedimentos imaturos, textural e mineralogicamente, caracterizados por arenitos finos argilosos e

abundantes estratificações cruzadas, alternadas com camadas silticas, indicativos, segundo Brandt Neto (1984), de ambiente fluvial meandrante.

O mesmo autor sugere a origem desta unidade a partir de rios anastomosados e leques aluviais. Ao nosso ver, (Lima Filho, 1990, inf. verbal-in: Sabadia, 1990), o autor utilizou-se de uma bibliografia anterior a 1983, onde o termo "braided" era traduzido como anastomosado. A partir de 1983 surge a terminologia "anastomosed", ficando então mais adequada a tradução como anastomosado, ao passo que a designação "braided" era então traduzida para entrelaçado. Assim sendo, a Unidade BM-1 da Formação Adamantina tem a sua origem a partir de rios entrelaçados ("braided") e leques aluviais, dentro da idéia de Brandt Neto, (1984), e agora melhor definidos.

De uma maneira geral, estes sedimentos são constituídos por arenitos médios a muitos finos, moderadamente selecionados, maciços ou com estratificação cruzadas, intercaladas por lentes silticas, mostrando-se por vezes, argilosos. São encontrados aflorando nas porções médias das encostas e nas partes baixas das bacias hidrográficas, acompanhando as drenagens dos cursos d'água ou nos cortes de estrada, com cores avermelhadas e, secundariamente, creme.

Características distintas desta formação podem ser observados na região próxima de Matão, onde encontramos arenitos grosseiros a conglomeráticos, com pouca matriz argilosa, maciços, com abundantes seixos de rochas básicas, quartzito, quartzo e rochas argilosas, que chegam a atingir 3 cm de diâmetro (Brandt Neto, 1984).

A Unidade BM-1 da Formação Adamantina repousa em discordância erosiva sobre os basaltos da Formação Serra Geral, como pode ser visto no corte esquerdo da estrada vicinal que liga o trevo 314 da Rodovia Washington Luiz à Destilaria Lagoa Dourada S.A., na primeira curva à direita logo após o encontro desta via de acesso com o Riacho do Chimbó.

IV.1.1.2 Unidade BM-2

Esta unidade constitui-se de arenitos finos, argilosos, mal selecionados, com freqüentes grãos arenosos médios dispersos, cores rosadas a avermelhadas e com abundantes nódulos carbonáticos milimétricos esparsos característicos, que não ocorrem na Unidade BM-1 (Brandt Neto, 1984).

Estes arenitos compõem a topografia ondulada, mais afastada das drenagens, que servem atualmente para o cultivo da cana-de-açúcar na área agrícola da Fazenda do Chimbó.

De acordo com Brandt Neto (1984), distribuem-se em bancos maciços com espessuras da ordem de três metros, separados por níveis silticos vermelhos com dez a trinta centímetros. São observadas pelotas de argila dispersas nestes arenitos.

O contato, ainda segundo o mesmo autor dá-se de forma transicional com a Unidade BM-1 subjacente, em toda a região.

V. HIDROGEOLOGIA REGIONAL

V.1 Características Hidrodinâmicas

O Aquífero Bauru, pertencente ao sistema sedimentar da Bacia do Paraná, aflora numa área de aproximadamente 104.000 Km², destacando-se não somente em função da grande ocupação territorial mas, de forma marcante, pelo potencial explorável de água subterrânea, sendo estimado em mais de 15.000 o número de poços em operação no Estado de São Paulo (Hassuda, 1989). Constitui-se em um corpo sedimentar heterogêneo, contínuo, com permeabilidade intergranular, via de regra de comportamento hidráulico livre, por vezes confinado, tendo como limites inferior e oriental os basaltos da Formação Serra Geral, sendo, na maioria dos casos, possível o intercâmbio de água entre o basalto fraturado e as unidades permeáveis do Grupo Bauru.

Os rios regionais cortam os sedimentos do Grupo Bauru até o contato com o basalto adjacente, formando-se assim, limites permeáveis que proporcionam uma maior interação água subterrânea/água superficial.

A espessura máxima considerada para todo o pacote do grupo atinge 250 metros (DAEE, 1988), nos locais mais elevados no centro da bacia, porém na cidade de Novo Horizonte encontra-se um poço executado pelo DAEE (1976), onde a espessura do Grupo Bauru alcança 360 metros.

Como já visto anteriormente, as litologias que compõem o Grupo Bauru são bastante variadas e, particularmente, no caso da

Formação Adamantina, em função dos contrastes bruscos de energia no processo da dinâmica deposicional a partir de rios entrelaçados e leques aluviais, dentro da idéia de Brandt Neto (1984), são comuns as ocorrências de areia, silte, argila, níveis conglomeráticos e distintos tipos de cimentação. Os percentuais de mistura destas frações granulométricas, a disposição seqüencial e espessura dos estratos, a natureza do cimento, o grau da cimentação, a coesão e as continuidades laterais das camadas mudam consideravelmente, favorecendo a ocorrência de diferentes condutividades hidráulicas no meio aquífero considerado, justificando assim, o amplo leque de valores encontrados para os parâmetros hidrogeológicos.

De acordo com os dados fornecidos pelo DAEE (1974 e 1976), o Aquífero Bauru apresenta valores de transmissividade entre 5 a 100 m²/dia, tendo sido calculado valores adicionais de T (depois da correção para a penetração parcial), a partir das vazões específicas medidas, obtendo-se um valor médio T = 17m²/dia.

Dividindo-se valor médio encontrado para a transmissividade pela espessura saturada estimada do aquífero, o valor da condutividade hidráulica média alcança 0,5 m/dia ($5,7 \times 10^{-4}$ cm/s), sendo menor que a condutividade hidráulica para as areias e areias silticas, e bem mais elevado que a dos pacotes argilosos localmente confinantes.

A água cedida aos poços produtivos provem certamente dos leitos arenosos ou areno-siltosos que, encontrarem-se limitados entre camadas de reduzida condutividade hidráulica, geram valores de coeficiente de armazenamento característicos da condição de pressões confinada/semi-confinada. A porosidade efetiva varia de

acordo com a granulometria, sendo estimada em 15% nas camadas arenosas (diâmetro médio dos grãos de 0,15mm) a 5% nos arenitos calcíferos e siltosos (DAEE, 1974 e 1976).

V.2 Características das Águas

Em termos gerais, as águas subterrâneas mostram-se com baixa salinidade, função do carácter predominante quartzoso dos sedimentos do Aquífero Bauru e da recarga direta das precipitações pluviométricas, apresentando, de acordo com DAEE (1988), resíduo seco entre 100 e 200 mg/l na maior parte da sua área de ocorrência. Estas águas são naturalmente bicarbonatadas cálcicas, relacionadas principalmente a existência de cimentação calcífera (Rebouças, 1976), mostrando-se com alto teor relativo em sílica, pH baixo entre 4,3 e 6,0, baixos teores em cloretos e especialmente de sulfatos em relação ao teor de carbonatos e bicarbonatos (DAEE, 1976).

As águas, de um modo geral, apresentam características físicas, químicas e bacteriológicas adequadas ao abastecimento público e uso geral, mostrando restrições, de acordo com DAEE (1988), em relação a 10% dos poços com teores acima de 10 mg/l de NO_3^- (nitrato).

V.3 Vulnerabilidade

Como já antevisto, o Aquífero Bauru mostra-se como um aquífero livre em quase todos os seus 104.000 Km² de extensão no Estado de São Paulo, podendo apresentar localmente confinamentos proporcionados por intercalações argilosas ou bancos calcíferos e, ainda, aquíferos suspensos.

Para a avaliação da vulnerabilidade de corpos aquíferos, torna-se necessário o conhecimento das características intrínsecas deste meio, tais como: condutividades hidráulicas horizontais e vertical, porosidades, capacidade de troca iônica, composição mineralógica, distribuição granulométrica, quantidade de matéria orgânica presente, espessura da zona não saturada, micro estruturação, etc., dados estes dificilmente encontrados com detalhamento necessário.

Outra informação de extrema importância na consideração de risco envolve a caracterização do(s) contaminante(s), no que diz respeito a configuração do potencial de dano, ou seja, grau de toxidez, inflamabilidade, corrosibilidade, reatividade, concentração, potencial de migração no meio, persistência, bem como os volumes aduzidos e a maneira de disposição deste(s) contaminante(s).

Uma quantificação do risco de poluição das águas subterrâneas torna-se, portanto, uma tarefa bastante complexa, devendo-se ainda somar a estes problemas as nuances das interações água subterrânea/água superficial.

Foster (1987), propôs então uma metodologia empírica para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos, envolvendo fatores

relacionados a inacessibilidade hidráulica e a capacidade de atenuação do meio, bem como, a carga contaminante em sua superfície, considerando-se as concentrações, mobilidade e persistência, fatores estes que, interrelacionados, indicam condicionamentos de maior ou menor risco de poluição das águas subterrâneas (Figura 08).

Avaliando-se a ocorrência livre das águas subterrâneas do Aquífero Bauru, assim como, a espessura de sua zona não saturada (vadosa), que encontra-se em geral entre 10 e 20 metros e, ainda, reconhecendo-se sua importância no que diz respeito a sua extensão e número de poços em operação, fica claro a necessidade de proteção de suas águas em função da vulnerabilidade natural evidente.

Na Tabela 02, temos, de acordo com Hirata et al (1990), o percentual de áreas de ocorrências do Aquífero Bauru em função das diferentes espessuras das zonas não saturadas.

FIGURA 08: Esquema Conceitual de Risco de Poluição Para a Água Subterrânea (Foster, 1987).

AQUÍFERO BAURU

Profundidade da Zona
Não Saturada

% Area

10 metros

20

20 metros

30

50 metros

35

100 metros

10

+100 metros

05

TABELA 02: Percentual de Áreas de Ocorrência do Aquífero Bauru em Função das Espessuras das Zonas não Saturadas Para o Estado de São Paulo (Hirata et al., 1990 - Modif.).

Os índices de vulnerabilidade natural mostrados no trabalho de Hirata et al (1990), para o Aquífero Bauru variam de moderado/alto (M/h) a baixo/alto (L/h). Note-se que, evidentemente, no caso de aquífero livre, a vulnerabilidade natural cresce em função da diminuição da zona não saturada, junto com a redução da capacidade de atenuação do meio.

VI. APRESENTAÇÃO, DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

VI.1 Caracterização e Modo de Disposição dos Efluentes

Os efluentes gerados na produção de açúcar e de álcool são considerados, em termos gerais, como de classe sazonal com vazões contínuas, porém variadas. Excetuando-se as cinzas, que emanam

das queimadas praticadas anteriormente a colheita da cana-de-açúcar, as características dos demais "resíduos" são bastante diversificadas devido as diferenças de concentração dos açúcares da cana e pelas particularidades locais de manejo. A flutuação dos teores de açúcar da matéria-prima pode ocorrer por fatores distintos, entre eles, as mudanças de clima e o tempo de estocagem.

Os principais efluentes resultantes da produção de açúcar e de álcool a partir da cana-de-açúcar são os que seguem (Braille e Cavalcante, 1979; Sabadia, 1990): cinzas oriundas das queimadas, águas de lavagem da cana-de-açúcar, bagaço, torta, águas condensadas dos evaporadores, águas condensadas das colunas barométricas e vinhaça; havendo também quem considere as águas de lavagem de pisos e equipamentos e os esgotos domésticos produzidos.

Neste tópico, serão discutidos a seguir, as características do primeiro e do último efluente líquido gerado durante o processamento industrial da cana-de-açúcar, quais sejam, as águas de lavagem da cana e a vinhaça.

VI.1.1 Águas de Lavagem da Cana-de-Açúcar

As águas de lavagem da cana, como já mencionado anteriormente, constituem o primeiro efluente líquido oriundo do processamento industrial da cana-de-açúcar. Os volumes gerados e as características destas águas são bastante variados em função do sistema de colheita utilizado. A colheita manual produz uma

cana mais limpa, todavia, devido ao rápido crescimento exigido na produção do açúcar e, principalmente, do álcool, novas técnicas de colheita e carregamento foram desenvolvidas, contribuindo para a introdução de um volume maior de impurezas no processo. Nesta operação de colheita e carregamento mecanizados, são considerados um total de impurezas que atinge até 10% do peso da matéria-prima.

Após a operação de lavagem da cana resulta um despejo que pode conter: sacarose exudada da cana durante as queimadas; matéria orgânica proveniente do solo, palha, pontas, etc.; microorganismos; diversas frações granulométricas dos constituintes minerais do solo; cinzas; etc.. Pode-se esperar, então, altos índices de DQO, sólidos e DBO, este último devido aos carboidratos, como no caso da sacarose (açúcar) e celulose.

Há uma grande diversidade nos resultados dos parâmetros físico-químico-biológicos, quando comparamos diferentes sistemas de operação de águas de lavagem da cana. Estes resultados variam, inclusive, em um mesmo sistema, tornando o efluente de difícil caracterização.

Valores médios de composição podem ser observados na Tabela 03, em estudos realizados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, na Usina Ester, no Município de Cosmópolis - SP.

Vazão Média.....	24.000 m ³ /dia
Resíduo Sedimentável.....	3,8 mg/l
DBO ₅ (à 20°C).....	203,0 mg/l
DQO.....	428,0 mg/l
pH (sem correção com leite de cal).....	4,8
Carga Diária de DBO ₅ (à 20°C).....	4.900 kg/m ³
Equivalente Populacional.....	90.000 habitantes

TABELA 03: Características Médias das Águas de Lavagem de Cana da Usina Ester, Cosmópolis - SP, in: Hespanhol, 1979.

Os sistemas de operação para a lavagem da cana-de-açúcar podem ser abertos ou semi-fechados. No primeiro caso, o tratamento e/ou disposição do efluente são considerados de custo mais elevado, conduzindo a dificuldades na operação, eficiência e segurança desejadas. Nos sistemas semi-fechados o efluente é reciclado na própria etapa de lavagem, valendo-se de eventuais descartes.

No caso da Destilaria Lagoa Dourada S.A., sede das avaliações deste estudo, o sistema de operação de lavagem da cana é do tipo semi-fechado, composto por três células/tanques com capacidade aproximada de 4.500 m³ cada, construídos com concreto, justapostos e interligados, onde o efluente circula continuamente, ocorrendo a decantação da parte sólida em sequência do primeiro ao terceiro módulo, quando as águas de lavagem retornam, fechando assim o ciclo de reutilização do sistema considerado. De acordo com Percebom e Valle do Amaral

(1985), as melhores condições de floculação e decantação são atingidas quando se corrige o pH com "leite de cal", entre os valores de 10,5 a 12, prática realizada no sistema operado na Destilaria Lagoa Dourada. Os valores de pH obtidos em campo para as águas de lavagem de cana consideradas oscilaram entre 10,27 e 11,02. Esta correção do pH aos valores acima citados, ainda segundo Percebom e Valle do Amaral (op. Cit.), impede ou inibe o desenvolvimento microbiano do meio, originando menos problemas de septibilidade.

Qualquer módulo (célula/tanque) pode ser provisoriamente abortado, sem comprometer a continuidade do processo, quando faz-se necessária a retirada dos sólidos decantados já em excesso. Esta operação de limpeza é executada por uma pá carregadeira do tipo "caterpillar - 966", que acessando as rampas inclinadas existentes a jusante dos tanques, insere-se dentro destes e repassa o material decantado para caminhões caçamba. O material é transportado e despejado em um extinto tanque de acumulação de vinhaça na Bacia Hidrográfica do Riacho do Chimbó, formando, posteriormente, uma espessa capa endurecida e altamente porosa de celulose, partículas minerais, etc.. As pressões geradas nesta remoção, limpeza e esvaziamento dos tanques promovem trincas e rachaduras, como dito anteriormente, em função dos pequenos recalques produzidos, alívio de pressão por esvaziamento e ações naturais intempéricas.

O descarte da parte líquida é efetuado por meio de tubulações diretamente em um outro antigo tanque de repasse de vinhaça, localizado em uma cota inferior ao tanque principal utilizado hoje em dia (vide Mapa de Localização dos Pontos

Amostrados).

O conjunto de informações acima relacionado gerou o interesse no monitoramento do possível repasse da carga poluidora do efluente aqui considerado para as águas locais, uma vez que a maneira de disposição nos parece constituir zonas de constante infiltração das águas servidas do processo de lavagem da cana.

Estas águas de lavagem foram analisadas seguindo-se os mesmos parâmetros para as amostras de vinhaça, das águas subterrâneas e das águas superficiais. A amostra foi coletada no terceiro módulo (célula/tanque), no momento de retorno de circulação do sistema e, portanto, o mais livre possível de materiais em suspensão.

VI.1.2 Vinhaça

A vinhaça representa, quando consideramos a sua carga poluidora (em função dos volumes produzidos), o principal efluente oriundo das usinas/destilarias de açúcar/álcool. Recebe muitas denominações decorrentes de regionalismos e/ou em função do amplo leque de profissionais que já abordaram a problemática do manejo da vinhaça. Entre as denominações mais corriqueiras apontamos: vinhoto, vinhote, garapão, caldas, tiborna, caxixe, restilo, etc.. Este efluente é obtido como produto final da destilação do álcool etílico, na proporção de 11 a 13 litros para cada litro de álcool gerado, e teve, a partir da safra 1979/1980, seu lançamento proibido, direta ou indiretamente, em qualquer coleção hídrica superficial, em função principal dos elevados

índices de DBO característico do vinhoto que, quando descartado em corpos d'água, compromete o equilíbrio floro-faunístico, como já antevisto.

A composição química da vinhaça é bastante variada em função de diversos fatores, tais como: tipo de cana, tempo de maturação e estocagem, sistemática de preparo do mosto, metodologia de operação e acompanhamento da fermentação, espécie de leveduras utilizadas, tipo de destilador, técnicas de destilação e tipo de flegma separado.

Durante o processamento da cana-de-açúcar para a fabricação do álcool, podem ser utilizados três tipos básicos de mosto, que se constitui numa solução concentrada a ser conduzida às dornas de fermentação. O mosto de melaço é um concentrado proveniente da diluição do mel ou melaço originado na fabricação do açúcar. O mosto de caldo consiste em uma solução corrigida, produto da moagem da cana. E, o mosto misto é uma mistura em que o mosto de melaço é diluído com o mosto de caldo.

Segundo Glória et al (1972 e 1973); Rodella et al (1980); Bolsanello e Vieira (1980); Medeiros (1981) e Vasconcelos e Oliveira (1981); in: Glória e Orlando Filho (1982) e Orlando Filho et al (1983), podemos na Tabela 04 avaliar as médias das diferentes composições químicas da vinhaça em função do tipo de mosto, para as regiões canavieiras de São Paulo, Rio de Janeiro, Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte.

A Matéria orgânica é o constituinte de maior destaque, seguido de valores mais baixos, porém, significativos de potássio (K_2O). Observa-se, de uma maneira geral, um decréscimo de nutrientes da vinhaça de mosto de melaço para a de mosto misto,

aparecendo a de mosto de caldo com os menores valores.

A vinhaça gerada na Destilaria Lagoa Dourada S.A.(destilaria autônoma) é proveniente do mosto de caldo.

São evidenciados os altos teores de matéria orgânica, responsáveis pelos elevados índices de DBO, valores apreciáveis de potássio, cloreto, sulfato e quantidades menores de ferro e manganês, dentre os parâmetros confrontáveis. O pH é normalmente ácido e a condutividade elétrica bastante elevada.

Elementos	Tipos de Mosto***		
	Melaço	Misto	Caldo
*N	0,77	0,46	0,28
*P ₂ O ₅	0,19	0,24	0,20
*K ₂ O	6,00	3,06	1,47
*CaO	2,45	1,18	0,46
*MgO	1,04	0,53	0,29
*SO ₄	3,73	2,67	1,32
*Mat. Org.	52,04	32,63	23,44
**Fe	80	78	69
**Cu	5	21	7
**Zn	3	19	2
**Mn	8	6	7
pH	4,4	4,1	3,7

* kg/m³

** ppm

*** valores médios de Glória et al., 1972 & 1973; Rodella et al., 1980; Bolsanello & Vieira, 1980; Medeiros, 1981 e Vasconcelos & Oliveira, 1981; in: Glória e Orlando Filho, 1982, modificado.

TABELA 04: Composição Química da Vinhaça de Mostos Distintos, Segundo Diversos Autores.

De uma maneira geral, as concentrações obtidas para a amostra de vinhaça analisada neste trabalho, registraram valores menores que a vinhaça analisada para a dissertação de mestrado de Hassuda (1989), porém, quase a totalidade dos valores mostra-se coerente.

A vinhaça foi coletada no momento de descarga no tanque de armazenamento, a uma temperatura aproximada de 80°C.

Quando consideramos a versatilidade da composição do vinhoto distinguimos múltiplos usos, dentre eles: adubo agrícola, produção de biogás, adição a ração animal, geração de proteínas unicelulares e produção de cinzas potássicas. De muito tempo atrás dispomos de referências que se reportam, segundo Centurión e Percebon (1982), às primeiras tentativas de um gerenciamento do problema da vinhaça, assim como em 1918 e 1943 em Pernambuco com o uso direto na lavoura; 1948, em São Paulo, também direto na lavoura e, na década de 40 são citados processos de evaporação e incineração, tidos como antieconômicos. É correto supor, entretanto, que no cálculo da antieconomicidade para as múltiplas aplicações da vinhaça não foi considerada a variável custo ambiental.

A vinhaça normalmente é utilizada como fertilizante na forma "in natura" por sua equivalência em relação aos fertilizantes tradicionais.

No caso da Destilaria Lagoa Dourada S.A., a vinhaça é aduzida continuamente para um tanque principal, com capacidade aproximada de 28.000 m³, escavado na Bacia Hidrográfica do Riacho do Chimbó, sendo posteriormente em parte bombeada para a fertirrigação com canhão hidráulico e outra parte disposta em caminhões tanque com a mesma finalidade. Há um segundo tanque localizado em uma cota inferior ao tanque principal utilizado para os despejos aleatórios das águas de lavagem da cana e como alternativa de segurança para a vinhaça.

Na entresafra da produção de álcool, a operação da

destilaria é modificada para atender a produção de bebidas alcoólicas, resultando na geração de volumes menores, porém constantes de vinhaça ao longo de todo o ano. Em função deste procedimento, somente de forma eventual o tanque principal é limpo, ocorrendo a retirada do material decantado.

Ao nosso ver, esta maneira de disposição em tanques escavados funciona como uma janela de infiltração contínua de vinhaça para as águas subterrâneas, sendo potencializada após a operação de limpeza, pela retirada do material precipitado que deve atuar de forma a colmatar e reduzir a capacidade de infiltração.

VI.2 Quadro Geológico Local

A área onde encontram-se distribuídos os tanques de vinhaça e os tanques de operação de lavagem da cana-de-açúcar, bem como o sistema de monitoramento por piezômetros, constitui-se em local de afloramento da Unidade BM-1 (Formação Adamantina/Grupo Bauru - Brandt Neto, 1984), representando a parte média das encostas e as porções mais deprimidas da Bacia Hidrográfica do Riacho do Chimbó.

Foram coletadas, registradas e rotuladas quatro amostras representativas da profundidade de 1,5 a 2 metros de cada furo realizado para a implementação dos piezômetros, assim escolhidas por mostrarem-se integras, pois, aproximadamente a partir desta profundidade, os furos foram continuados com o método rotativo direto, utilizando lama bentonítica como fluido de perfuração e,

portanto maculando os percentuais reais da granulometria para toda a amostragem de calha da operação de sondagem.

As análises granulométricas foram processadas de acordo com a rotina a seguir, no Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada do Departamento de Geologia da UFC.

IV.2.1. Análises Granulométricas

O processamento granulométrico das amostras envolveu inicialmente o quarteamento, sendo os sedimentos desagregados a seguir manualmente com o auxílio de um pistilo de borracha e cuba de porcelana.

O sedimento, já com as suas frações desagregadas, foi submetido a pipetagem para o dimensionamento das partículas entre 0,062 e 0,004 milímetros de diâmetro e o peneiramento a seco para as partículas com diâmetros entre 4 e 0,062 milímetros.

Com a finalidade de evitar o problema de floculação (fase de pipetagem), utilizou-se pirofosfato de sódio junto a suspensão aquosa, sendo homogeneizada com agitação manual.

A escala granulométrica utilizada na fase seca foi a de Wentworth (1922), sendo que no peneiramento foram utilizadas peneiras de 4; 2,830; 2; 1,410; 1; 0,707; 0,500; 0,354; 0,250; 0,177; 0,125; 0,088 e 0,062 milímetros de abertura de malha.

A Figura 09 mostra os histogramas de distribuição das classes granulométricas para as amostras de 1,5 a 2 metros relativas as sondagens 1, 2, 3, e 4 (p/ piezômetro respectivo).

As análises granulométricas, mesmo de forma simples e

restrita, foram realizadas de modo a fornecerem alguns aspectos da distribuição estatística total das frações granulométricas da Unidade BM-1 (Brandt Neto, 1984) da Formação Adamantina na área deste estudo.

Figura 09: Histogramas de Distribuição das Classes Granulométricas para as Amostras de 1,5 a 2 metros Relativas as Sondagens 1, 2, 3 e 4 para a Instalação dos Piezômetros Respective (Escala de Wentworth, 1922).

Destaca-se o predomínio da fração areia fina para todas as amostras, sendo também marcantes os valores percentuais para a fração variando de silte grosso a silte fino, caracterizando as amostras como um arenito siltoso.

Os valores registrados na curva granulométrica para o diâmetro efetivo mostram os seguintes resultados: furo 01 (de 1,5 a 2 metros)/diâmetro efetivo (D_{10}) = 0,0085; furo 02 (de 1,5 a 2 metros)/diâmetro efetivo (D_{10}) = 0,02; furo 03 (de 1,5 a 2 metros)/diâmetro efetivo (D_{10}) = 0,02 e furo 04 (de 1,5 a 2 metros)/diâmetro efetivo (D_{10}) = 0,03.

Os percentuais encontrados para cascalho e areia muito grossa no furo 02, representam fragmentos de rochas basálticas, provavelmente da Formação Serra Geral.

O cimento carbonático está presente, reagindo com facilidade com o ácido clorídrico diluído frio.

VI.3 Avaliação de Condutividade Hidráulica

O movimento de fluidos em meios porosos saturados ou não saturados, como tema de pesquisa, encontra-se relacionado a distintos ramos da ciência e da aplicação técnica, tais como: mecânica dos fluidos, água subterrânea, engenharia do petróleo, geotecnia, agronomia, física do solo, poluição, etc..

No caso particular da água como fluido e do aquífero como meio poroso, o fluxo saturado é comumente descrito em termos da equação de Darcy (1856), que estabelece uma proporcionalidade

direta entre a densidade de fluxo e o gradiente hidráulico, servindo como base para o entendimento do fluxo das águas subterrâneas.

Em estudos compreendendo a avaliação de poluição das águas subterrâneas, torna-se de fundamental importância o conhecimento dos condicionantes hidrológicos. Assim sendo, buscou-se neste trabalho determinar as condutividades hidráulicas e a potenciométrica do Aquífero Bauru na área imediata sob influência das fontes poluidoras, obtendo-se as ordens de valores para as velocidades de percolação.

A permeabilidade ou condutividade hidráulica de um meio poroso representa a facilidade ou dificuldade com que um fluido se movimenta neste meio, podendo ser expressa por:

$$K = Q / A (dh/dl) \quad (VI.1)$$

onde, Q representa a vazão [L^3/T]; A é a área [L^2] e dh/dl o gradiente hidráulico adimensional, o que mostra que K tem as dimensões [L/T], ou seja de uma velocidade.

A razão de descarga de um fluido através de uma seção, depende não só do meio e do gradiente de pressão hidrostática, mas, também, da densidade e viscosidade do fluido, as quais são função da temperatura e pressão. Este fato concorreu para o estabelecimento de um conceito de permeabilidade independente das propriedades do fluido responsável pelo fluxo:

$$K = K_o \gamma / \mu \quad (VI.2)$$

onde, K_o é a permeabilidade intrínseca, específica, geométrica ou coeficiente de permeabilidade; γ é o peso específico do fluido considerado (dinas/cm^3) e u representa a viscosidade deste fluido ($\text{dinas}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$).

A permeabilidade intrínseca K_o corresponde a um coeficiente que é controlado pelas propriedades do meio, quais sejam: diâmetro dos grãos, seleção, forma e disposição espacial das partículas, independentemente da densidade e viscosidade do fluido de circulação.

Apresentando K_o em cm/s , γ em dinas/cm^3 e u em $\text{dinas}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$, temos pela equação (VI.2) que K_o é expresso em cm^2 [L^2], sendo função de uma dimensão característica do meio e podendo ser interpretado, aproximadamente, como uma área de poros única governando o fluxo. A unidade mais costumeiramente utilizada para a permeabilidade intrínseca K_o é o darcy, que representa $0,987 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$. Entretanto, K_o é raramente utilizado em hidrologia subterrânea, tendo melhor aplicação nas indústrias de petróleo e gás natural.

As unidades mais usuais para a condutividade hidráulica K_o são expressas em metro/dia (m/dia); metro/segundo (m/s) ou centímetro/segundo (cm/s).

De acordo com Greenberg, Gresap e Malone (1968, in: Custodio e Llamas, 1983) os valores de K_o podem ser influenciados pela temperatura até $0,5\%/^{\circ}\text{C}$, considerando-se materiais friáveis ou pouco cimentados. Na prática, não é considerada esta variação uma vez que os erros experimentais alcançam valores maiores.

Entretanto, quando consideramos as variações de u (viscosidade do fluido) em relação a temperatura, obtemos valores

da ordem de 4%/°C, o que significa que um aumento de temperatura de 5°C impõe uma elevação de 20% na condutividade hidráulica. Quanto mais elevada a temperatura, menor a viscosidade e, portanto, mais facilmente o fluido circulará através dos poros do aquífero.

Na Tabela 05 temos os valores de μ (em centipoises) para a água destilada em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Viscosidade Dinâmica em Centipoises	Temperatura (°C)	Viscosidade Dinâmica em Centipoises
0	1,792	28	0,836
1	1,731	30	0,801
2	1,673	32	0,768
3	1,619	34	0,737
4	1,567	36	0,708
5	1,519	38	0,681
6	1,473	40	0,656
7	1,428	42	0,632
8	1,386	44	0,610
9	1,346	46	0,588
10	1,308	48	0,568
12	1,236	50	0,549
14	1,171	52	0,531
16	1,111	54	0,515
18	1,056	55	0,506
20	1,005	60	0,469
22	0,958	65	0,435
24	0,914	70	0,406
26	0,874		

TABELA 05: Viscosidades da Água Pura em Função de Diferentes Temperaturas (Perry, 1958 in: Custodio e Llamas, 1983).

No caso particular da infiltração da vinhaça, que na lagoa escavada de armazenamento/repasso atinge valores de temperatura até 70°C podemos considerar variação de condutividade hidráulica de 170%, facilitando assim o acesso do contaminante ao aquífero.

Evidentemente, as altas temperaturas de chegada da vinhaça à lagoa de acumulação são rapidamente dissipadas, encontrando-se valores de 27°C a 10 metros abaixo do local de disposição.

Contrapondo-se a este incremento na condutividade hidráulica gerado pelas altas temperaturas da vinhaça, temos as elevadas concentrações iônicas dos contaminantes, que elevam a viscosidade dinâmica do percolado e retardam a infiltração e o efeito de colmatação, que responde de maneira idêntica, reduzindo as áreas de acesso de fluxo pela fixação do material em suspensão, comuns tanto na vinhaça como nas águas de lavagem da cana.

Segundo Bouwer (1978), a condutividade hidráulica K_0 pode ser afetada caso as partículas argilosas do meio poroso e os cátions do fluido contaminante não se encontrem ainda em equilíbrio.

Neste caso, as mudanças nas condições das argilas do estado floculado (estruturado) para o estado disperso pode resultar em decréscimo de K_0 , ou vice-versa.

Os valores da condutividade hidráulica K_0 podem ainda ser influenciadas pelo peso específico γ , que exprime a força motriz do fluido. No caso da vinhaça e das águas de lavagem da cana, por serem mais densas que as águas naturais do Aquífero Bauru (valores entre 1,5 a 8% maiores) podem ocorrer correntes descendentes por efeito do contraste de densidade (Figura 10).

Figura 10: Efeito da Densidade na Migração de uma Solução Contaminante Sob Fluxo Uniforme. (A) pouco mais denso que a água subterrânea; (B) intermediário e (C) grande contraste de densidade (Freeze and Cherry, 1979 in: Cleary, 1989).

VI.3.1 Determinação de Condutividade Hidráulica

A determinação da condutividade hidráulica (permeabilidade) consiste em um problema delicado, já que as pequenas variações faciológicas (composicionais e granulométricas) tem uma influência marcante.

As litologias que compõem o aquífero sedimentar Bauru são bastante variadas e, particularmente, no caso da Formação Adamantina, em função dos contrastes bruscos de energia que caracterizam a deposição a partir de rios entrelaçados e leques aluviais, são comuns as ocorrências de areia, silte, argila, níveis conglomeráticos e distintos tipos de cimentação. Os percentuais de mistura destas frações granulométricas, a disposição seqüencial e espessura dos estratos, a natureza do cimento, o grau de cimentação, a coesão e as continuidades laterais das camadas mudam consideravelmente, favorecendo a ocorrência de diferentes condutividades hidráulicas no meio aquífero considerado e, portanto, impondo diferentes velocidades de infiltração e percolação.

A direção de fluxo considerado em relação ao plano de estratificação também traduz distintas condutividades hidráulicas. Nos arenitos da Formação Botucatu (Bacia do Paraná) foram obtidos os seguintes valores de permeabilidade: 7×10^{-4} cm/s, perpendicularmente à estratificação, e $1,1 \times 10^{-3}$ cm/s paralelamente à estratificação (Suguio, 1980 b).

Os testes para a determinação de condutividade hidráulica podem ser realizados "in situ" ou, através de ensaios de

laboratório com amostra não deformada do material aquífero por meio de permeâmetros que podem ser de carga constante ou variável. O teste com permeâmetros de carga constante consiste na medição de uma taxa de fluxo através de uma amostra do meio poroso, mantendo-se a carga hidráulica constante. O teste em permeâmetro de carga variável mede a variação da carga hidráulica em função do tempo.

As determinações de condutividade hidráulica em laboratório são, portanto, aproximações pontuais, sensíveis à rotina do laboratório, à aptidão do técnico executor e a não deformabilidade das amostras.

Muitas fórmulas para o cálculo de permeabilidade foram propostas incluindo dados tomados da curva granulométrica e/ou porosidade. Estas fórmulas buscaram encontrar uma dimensão característica cujo quadrado seja proporcional a K_0 (Custodio e Llamas, 1983), uma vez que as dimensões da permeabilidade intrínseca são $[L^2]$.

Experimental e analiticamente foram estabelecidas diversas fórmulas, tais como a Hazen, cuja forma geral pode ser expressa por:

$$K_0 = c.d_{10}^2 \quad (VI.3)$$

onde c é uma constante e d_{10} constitui o diâmetro efetivo (equivalente), relacionado ao valor de d_{10} da curva granulométrica. A designação "diâmetro efetivo" foi utilizado por Hazen em estudos com filtros de areia, em 1892, sendo definido como o tamanho da partícula tal que, em peso, 10% da amostra é

mais fina e 90% mais grossa.

Para K_0 em cm/s a 20°C e d_{10} em centímetro, os valores de c são 45,8 e 142 respectivamente para areias argilosas e para areias puras, sendo freqüente o valor $c = 100$, com margem de variação mais usual entre 90 e 120 (Cedergren, 1967 in: Custodio e Llamas, 1983).

Os valores encontrados para a condutividade hidráulica K , relacionada a fórmula de Hazen para $c = 45,8$, nas profundidades de 1,5 a 2 metros de cada sondagem para a instalação dos piezômetros estão entre $3,3 \times 10^{-3}$ a $4,1 \times 10^{-3}$ cm/s.

Notadamente, das várias fórmulas existentes para o cálculo da permeabilidade, nem todas são gerais e poucas conduzem a resultados precisos, em função das dificuldades de inserção das possíveis variações do meio geológico aquífero.

Os métodos para a determinação da condutividade hidráulica em campo são tidos como mais dignos de confiança. Os mais usuais são: os ensaios de bombeamento; por registrarem um valor integral da permeabilidade de uma seção razoável do meio aquífero, porém, somente utilizáveis em trabalhos de poluição quando não houver problemas de perturbações sobre a qualidade das águas subterrâneas locais e o teste conhecido em inglês como "slug test". Optou-se pela realização deste último método, já amplamente discutido na metodologia, em função da necessidade de não se produzir grandes perturbações de fluxo e, portanto, não modificando a qualidade das águas subterrâneas no local. Buscou-se também, correlacionar a qualidade das águas amostradas com os valores das condutividades hidráulicas medidas, para cada seção piezométrica ensaiada.

A tabela 06 mostra a relação entre as condutividades hidráulicas obtidas pelo método "slug test" e as condutividades elétricas das águas amostradas nos diferentes níveis piezométricos.

Nível Piezométrico	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Condutividade Elétrica da Água Amostrada (micro-S/cm)	
		Mínimo	Máximo
Pz ₁₁	$6,0 \times 10^{-4}$	270	410
Pz ₁₂	$8,0 \times 10^{-3}$	320	620
Pz ₂₁	$1,5 \times 10^{-3}$	320	330
Pz ₂₂	$7,3 \times 10^{-3}$	200	380
Pz ₃₁	$5,7 \times 10^{-3}$	750	830
Pz ₃₂	$4,0 \times 10^{-2}$	840	920
Pz ₄₁	$2,4 \times 10^{-3}$	320	420
Pz ₄₂	$1,8 \times 10^{-3}$	230	740

TABELA 06: Relação entre as Condutividades Hidráulicas (Método "slug test") e as Condutividades Elétricas das Águas Amostradas nos Diferentes Níveis Piezométricos.

De uma maneira geral, os valores mais elevados de condutividade hidráulica sugerem estar relacionados a valores igualmente altos da condutividade elétrica das águas amostradas. Este fato indica a natureza mais quartzosa e quimicamente mais inerte das frações arenosas, onde as velocidades de acesso dos contaminantes estão facilitadas.

Os testes, segundo o método "slug test", devem ser encarados como geradores de ordem de grandeza (valores não absolutos), fornecendo dados não totalmente precisos.

A experiência de campo mostrou, que para os nossos ensaios com deslocamentos volumétricos de 4,13 litros em piezômetros de

P.V.C. De 3/4" e filtro de 80 cm, o restabelecimento do nível estático original dá-se de maneira rápida, dificultando monitoramento com medidor eletro-sonoro-luminoso em função do tempo, a partir de valores de condutividade hidráulica de 10^{-2} cm/s (como exemplo o piezômetro P₃₂).

VI.4 Relações Potenciométricas Aguas Subterrâneas/Aguas Superficiais

Regionalmente, por tratar-se de um aquífero preponderantemente livre, a recarga é feita basicamente pela pluviometria, ficando portanto, a amplitude de variação do lençol freático condicionado a este fator.

No período de setembro de 1991 a agosto de 1992 foram realizadas 03 (três) rotinas de medição dos níveis d'água no sistema piezométrico instalado, com a utilização de um medidor de nível eletro-sonoro, ou luminoso que, juntamente com os dados potenciométricos do poço de "background", possibilitaram entender as relações horizontais e verticais de fluxo, vindo a compor o Mapa Potenciométrico da Área Monitorada (Figura 11).

Normalmente, os níveis do lençol freático obedeceriam as formas suavemente onduladas do relevo, acompanhando as curvas dos níveis topográficos, porém com um gradiente menor. Entretanto, no caso da área de estudo, tanto as células/tanques de decantação das águas de lavagem da cana, quanto as lagoas de estocagem/repasso de vinhaça, atuam de maneira a transferir

grandes volumes para o meio aquífero, sendo responsáveis por uma infiltração induzida com forte incremento do nível d'água subterrâneo local.

As águas de lavagem da cana contribuem com uma infiltração média de $2.400 \text{ m}^3/\text{mês}$ considerando-se 10% de área útil para fluxo nas células/tanques de decantação, $K = 10^{-4} \text{ cm/s}$ (vertical) e $i = 1$. Para a vinhaça, admitindo-se iguais valores para K (vertical) e i , temos um repasse médio de $18.200 \text{ m}^3/\text{mês}$.

Pela avaliação do perfil potenciométrico da Figura 12, observa-se que os volumes provenientes da infiltração da vinhaça e das águas de lavagem da cana tem uma influência determinante sobre a elevação do nível d'água subterrâneo local, principalmente quando comparado ao nível d'água original (linha reta tracejada), que corresponde, aproximadamente, ao traço, em perfil, da superfície freática livre, sem a influência da infiltração.

Figura 11: Mapa Potenciométrico Local da Área Estudada

Figura 12: Perfil Potenciométrico Mostrando o Impacto da Infiltração Induzida dos Efluentes no Nível Freático local.

Desta maneira, destaca-se que a elevação da potenciometria local encontra-se principalmente condicionada pela infiltração da vinhaça e das águas de lavagem da cana. As linhas de contorno potenciométrica são fechadas nas imediações da área de infiltração e deformam-se progressivamente em função da inclinação do gradiente regional. A área de infiltração funciona como uma zona de dispersão das linhas de fluxo local (Figura 13).

Regionalmente, o caminhamento dos fluxos (subterrâneo e superficial) ocorrem dos divisores de água da Bacia Hidrográfica do Riacho do Chimbó em direção ao talvegue, seguindo a direção de fluxo do córrego, de comportamento efluente em todo o trecho avaliado.

O monitoramento realizado nos níveis piezométricos Pz₄₁ & Pz₄₂ (instalados na margem direita do Riacho do Chimbó, bem próximo ao álveo do córrego), mostram que as cotas dos níveis d'água apresentam uma tendência de ocorrerem mais elevadas quanto mais profundo for o ponto de tomada de pressão potenciométrica (filtro do piezômetro), fato este, indicativo da ocorrência de um gradiente vertical ascendente, evidenciando o caráter efluente do córrego.

Figura 13: Diagrama Mostrando as Linhas de Fluxo por Efeito da Recarga Induzida (Infiltração) em Superfície Freática Inclínada (M. Deutsch in: Cleary, 1989).

Com relação aos seis níveis piezométricos instalados nas imediações das lagoas de repasse/estocagem de vinhaça e das células de reciclagem das águas de lavagem da cana, o monitoramento realizado permitiu definir uma tendência das cotas dos níveis d'água serem mais baixas quanto mais profundo estiver localizado o ponto de medida (tomada de pressão potenciométrica). Desta forma, temos no geral, a ocorrência de um gradiente vertical descendente, indicativo da infiltração contínua de vinhaça e água de lavagem da cana para o Aquífero Bauru. Percebe-se registros mais acentuados deste gradiente em relação ao piezômetro 03 (Pz₃₁ & Pz₃₂), onde foram registrados os maiores valores para condutividade hidráulica.

VI.5 Qualidade Físico-Química das Águas Subterrâneas

O sistema de operação para o monitoramento das águas subterrâneas consiste dos quatro piezômetros de dois níveis instalados e do poço profundo com 300 metros que serviu de "background".

A água subterrânea do poço profundo localizado a montante da área de estocagem dos efluentes, representa a água do Aquífero Bauru sem a interferência desta maneira de disposição em lagoas escavadas de vinhaça e das células/tanques de decantação das águas de lavagem da cana. Estas águas foram amostradas com o objetivo de serem utilizadas como valores de referência em relação as análises físico-químicas das amostras dos piezômetros.

As águas dos piezômetros representam, na verdade, as águas subterrâneas sob o impacto da infiltração e percolação dos efluentes na maneira da disposição considerada.

De uma maneira geral, as águas subterrâneas do Aquífero Bauru mostram-se com baixa salinidade, em função da recarga direta das precipitações pluviométricas e do caráter predominantemente quartzoso dos seus sedimentos, mostrando-se naturalmente como bicarbonatadas cálcidas, relacionadas a ocorrência de cimento carbonático.

Para a água amostrada no poço profundo de "background" e, com o intuito de comparação, trabalhando igualmente os dados da amostra do poço tipo amazonas (cacimba de "background") do trabalho de Hassuda (1989), foram plotados no diagrama de análises d'água de Piper, caracterizando, em ambos os casos, águas cloretadas cálcicas. (Figura 14).

Os municípios de Dobrada (presente trabalho) e Novo Horizonte (trabalho de Hassuda, 1989), representam regiões de intensa atividade sucro-alcooleira, manejando grandes volumes de vinhaça.

DIAGRAMA DE ANÁLISE D'ÁGUA (PIPER)

Figura 14: Diagrama de Análise d'Água de Piper para as Águas Subterrâneas de "Background" para Este Trabalho (1) e para o Trabalho de Hassuda, 1989 (2). Ambas Cloretadas Cálcicas (Aqüífero Bauru).

As caracterizações como águas cloretadas cálcicas, para as águas subterrâneas do Aquífero Bauru, amostradas como "background" nos dois municípios anteriores, permitem sugerir uma evolução físico-química regional destas águas, considerando-se o cloreto como um dos elementos químicos de maior ocorrência na vinhaça e de grande mobilidade. Entretanto, o contingente de amostras não permite embasar tal fato, cabendo somente a sugestão para futuros trabalhos.

Os resultados das análises físico-químicas obtidas para as amostras do poço profundo de "background" e da bateria de piezômetros, permitiram definir a ocorrência da alteração da qualidade das águas subterrâneas locais a partir da infiltração e percolação de vinhaça e das águas de lavagem da cana.

A tabela 07 apresenta os valores encontrados para as análises físico-químicas da vinhaça, águas de lavagem da cana, poço de "background" e dos piezômetros, representando estes últimos, valores absolutos e extremos (mínimo e máximo).

PARAMETROS	VINHAÇA	AGUA DE LAVAGEM	POÇO DE "BACK	PIEZOMETROS (1)	
	(1)	DA CANA (1)	GROUND" (1)	MIN	MAX
SODIO (2)	6,8	18,2	3,1	3,9	16
POTASSIO (2)	868	188	3,8	2,9	132
MAGNESIO (2)	7,84	8,2	1,4	9,3	25,1
CALCIO (2)	57,2	184	4,46	13,6	38,8
MANGANES (2)	6,7	0,79	0,02	0,03	3,5
FERRO (2)	14	11,3	< 0,12	0,45	34
ALUMINIO (2)	9,2	8,54	< 1	1	52
CLORETO (2)	888	130	25	1	150
SULFATO (2)	138	12	2	2	18
FOSFATO (2)	3,5	8	0,015	0,03	0,38
BICARBONATO	-	-	24	77	296
CARBONATO	-	1.768	-	-	75
MAT.ORG. (2)	11.588	8.268	< 2	< 2	2,9
pH (3)	3,3 - 3,6	10,2 - 11	6 - 7	5,8	6,6
COND.ELET.	3.768 (4)	3.448 (4)	62 - 75 (5)	288	928

(1) mg/l; (2) valores totais; (3) unid.pH (valores mín. e máx. de campo); (4) micro-S/cm (valores médios de campo) e (5) micro-S/cm (valores mín. e máx. de campo).

TABELA 07 » Dados Físico-Químicos das Amostras de Vinhaça, Águas de Lavagem da Cana, Poço de "Background" e Piezômetros.

Observando-se os valores dos parâmetros químicos das análises das águas amostradas nos piezômetros, nota-se, de maneira geral, um acréscimo acentuado, podendo exceder em mais de cem vezes os parâmetros correspondentes relacionados ao poço profundo de "background". Dentre eles, os íons manganês, ferro, alumínio e fosfato ultrapassaram os valores dos padrões de potabilidade para consumo humano, referidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS), Estado de São Paulo e Resolução CONAMA nº 20 (Tabela 08).

Os valores referidos como padrão para o manganês pelo Estado de São Paulo é de 0,05 mg/l; 0,1 mg/l pela Resolução CONAMA nº 20 e 0,5 mg/l pela Organização Mundial da Saúde. Os valores registrados nas análises das amostras dos piezômetros

oscilaram de 0,03 a 3,5 mg/l.

Para o ferro, o valor padrão referido pelo Estado de São Paulo e pela Resolução CONAMA nº 20 alcançam 0,3 mg/l e, a Organização Mundial de Saúde considera o valor padrão de 1,0 mg/l como teor máximo admissível. Nos piezômetros, as amostras analisadas mostram valores entre 0,45 e 34 mg/l para o ferro total.

O manganês e o ferro podem atuar de maneira a interferir no aspecto estético da água para consumo. O ferro altera notavelmente o sabor da água, tornando-o invariavelmente amargo, doce adstringente, com o característico "sabor ferro" (CETESB, 1977).

PARAMETROS (mg/l)	DMS (1)	ESTADO DE SAO PAULO (2)	RESOLUÇÃO CONAMA (3)	PIEZOMETROS (4)
MANGANES	0,5	0,05	0,1	0,03 - 3,5
FERRO	1	0,3	0,3	0,45 - 34
ALUMINIO	-	-	0,1	1 - 52
FOSFATO	-	-	0,025	0,03 - 0,38

(1) Organização Mundial de Saúde (DMS), 1971-Concentração Máxima Permissível na Água a ser Introduzida no Sistema de Distribuição;

(2) Decreto Estadual nº 12.486 de 20/10/78, NTA-60, Padrões Aplicáveis a Área de Poços;

(3) Resolução CONAMA nº 20, de 18/06/86;

(4) Amostras dos Piezômetros. Valores Mínimos e Máximos.

TABELA 08: Parâmetros Químicos que Excederam Padrões de Potabilidade para a Água Subterrânea.

A Resolução CONAMA nº 20, registra como teor máximo admissível para o alumínio 0,1 mg/l, enquanto que os valores obtidos para as análises nos piezômetros ficaram entre 1,0 e 52 mg/l, ou seja, todas pelo menos dez vezes acima do valor

referido.

Os íons manganês, ferro e alumínio podem influenciar no decréscimo da capacidade produtiva de um poço quando, precipitados na forma de óxidos e hidróxidos, obstruem a formação aquífera na vizinhança da adução e/ou nas aberturas dos filtros. O óxido ferroso hidratado é um tipo de lodo escuro, enquanto que o óxido férrico é marrom avermelhado, comparável a ferrugem comum. O manganês, na forma de óxido insolúvel, tem cor marrom escura (Johnson, 1978).

O valor referido como padrão de potabilidade para fosfato, segundo a Resolução CONAMA nº 20, é de 0,025 mg/l. Os valores analisados nas amostras dos piezômetros mostram-se entre 0,030 e 0,38, bem acima dos valores recomendados.

Evidentemente, as alterações hidroquímicas não ficaram restritas aos parâmetros descritos acima, em função da natureza multicomposicional dos efluentes e da dinâmica interativa com o meio poroso aquífero. A água coletada no poço de "background" mostra-se cloretada cálcica, de acordo com o diagrama de Piper, sofrendo evolução para bicarbonatadas cálcicas e magnesianas, nos níveis piezométricos Pz11, Pz21, Pz22, Pz41, Pz42 e, para bicarbonatadas sódicas nos níveis Pz31 e Pz32 (Figura 15).

O potencial interativo de um meio poroso representa a capacidade de ocorrência de reações físico-químicas de forma natural, sendo definido como atividade deste meio. A atividade de um material geológico sedimentar encontra-se relacionado à fração argila, uma vez que os minerais que compõem as demais frações granulométricas (silte, areia, etc.), de maneira geral, não são considerados com atividade relevante.

DIAGRAMA DE ANÁLISE D'ÁGUA (PIPER)

Figura 15: Evolução Físico-Química para as Águas Subterrâneas Amostradas no Sistema Piezométrico Sob Efeito da Infiltração dos Efluentes Considerados. Pz11, Pz21, Pz22, Pz41, Pz42: bicarbonatadas cálcicas e magnesianas; Pz31 e Pz32: bicarbonatadas sódicas e Pz12: cloretadas cálcicas e magnesianas.

A definição dos mecanismos que controlam a migração de substâncias poluentes em meios porosos é uma tarefa complexa e, de certa maneira, a caracterização e entendimento de todas as reações envolvidas não foi ainda completamente elucidada.

A seguir, será avaliado o comportamento dos parâmetros físico-químicos analisados para as amostras da água subterrânea local.

pH

A concentração relativa hidrogeniônica de uma amostra d'água indica se esta água atua como um ácido fraco ou como uma solução alcalina. Os valores de pH levantados em campo nos piezômetros ficaram entre 5,8 e 6,6, havendo, portanto, um pequeno decréscimo em relação aos valores de pH entre 6,0 e 7,0 registrados para o poço de "background".

O pH da vinhaça atinge valores entre 3,3 e 3,6 e as águas de lavagem da cana, em função da correção com "leite de cal", entre 10,2 e 11.

Os valores de pH, para uma substância poluente, interferem na capacidade de troca iônica de um meio poroso aquífero. De uma maneira geral, quanto mais alto for o pH maior será a capacidade de troca catiônica, em função do aumento do nível de dissociação de hidroxilas nas extremidades e na superfície das partículas argilosas (Nobre, de Campos e da Fontoura, 1987).

Acima de um pH igual a 8 (águas de lavagem da cana corrigidas com "leite de cal") a capacidade de troca catiônica é consideravelmente maior. Abaixo de um pH igual a 4 (vinhaça) a

troca de ânions pode ser significativa (Bonaparte, 1982).

A pequena redução nos valores de pH da água dos piezômetros com a infiltração da vinhaça, pode ser entendida pela neutralização devido as reações dos íons hidrogênicos com o carbonato existente na Formação Adamantina como cimento.

No caso das águas de lavagem da cana, com carbonatos e hidroxilas já em maiores concentrações (pH entre 10,2 e 11,0), as reações encontram-se favorecidas, possibilitando associações com os cátions existentes nos sedimentos. O resultado destas reações é a formação de compostos químicos de baixa solubilidade, havendo uma neutralização e conseqüente precipitação dos mesmos (Shepard e Cherry, 1980 in: Nobre, de Campos e da Fontoura, 1987).

Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica mostrou valores entre 200 e 920 micro-S/cm, considerados muito altos, quando comparados aos valores entre 62 a 75 micro-S/cm, obtidos das águas amostradas no poço de "background".

O forte incremento nos valores da condutividade elétrica na água subterrânea amostrada nos piezômetros, em contraste com os baixos valores do poço de "background", mostra claramente a transferência dos constituintes da vinhaça e das águas de lavagem da cana para o aquífero.

Os principais íons detectados nas águas dos piezômetros em concentrações mais elevadas e que são responsáveis pelo caráter condutor destas águas são o bicarbonato, cloreto, potássio, alumínio, cálcio, ferro e magnésio. Vale ressaltar que

concentrações idênticas para diferentes tipos iônicos conduzem a diferentes condutividades elétricas. Porém, para a maioria das águas subterrâneas naturais, os valores de sólidos totais dissolvidos podem ser satisfatoriamente avaliados pela condutividade elétrica multiplicada por um fator entre 0,55 a 0,75.

Sódio, Potássio, Magnésio e Cálcio

Estes parâmetros serão discutidos conjuntamente por tratarem-se de ions metálicos grandes, alcalinos e alcalinos terrosos, relacionados as séries de preferência de troca catiônica.

O sódio representa um ion com solubilidade elevada, sendo de difícil precipitação. Em todos os níveis piezométricos amostrados os resultados obtidos para o sódio, entre 3,9 a 16,0 mg/l, encontram-se acima do valor analisado para as águas do poço de "background" (3,1 mg/l). Este fato indica um baixo poder de retenção do meio poroso para este ion.

As águas de lavagem da cana respondem por maiores concentrações relativas (18,2 mg/l), quando comparadas a vinhaça (6,8 mg/l), sendo ambos os responsáveis pelo incremento nos valores de sódio nas águas subterrâneas locais.

O potássio representa, igualmente, um elemento de alta solubilidade e difícil de precipitar, apresentando concentrações entre 2,9 e 132 mg/l nas amostragens dos piezômetros, enquanto o valor para o poço de "background" ficou em 1,4 mg/l.

O elemento potássio mostra-se como um dos principais

constituintes da vinhaça (860 mg/l) e das águas de lavagem da cana (188 mg/l). Entretanto, avaliando-se as concentrações analisadas nas águas dos piezômetros, entre 2,9 e 132 mg/l, percebe-se que este íon foi afetado pelos processos de troca de bases, tendo sido em parte adsorvido, restringindo-se assim, um maior repasse de potássio para as águas subterrâneas. Segundo Custodio e Llamas (1983), o potássio é facilmente envolvido na troca de base, sendo absorvido de forma muito pouco reversível por argilas em formação (passando de montmorilonitas a illitas), para tomar parte de suas estruturas, diferindo notavelmente do sódio.

O potássio, mesmo sofrendo reações de troca iônica, passou para o aquífero em altas concentrações, principalmente relacionadas aos níveis piezométricos Pz₃₁ e Pz₃₂ (126 e 132 mg/l, respectivamente), com maiores valores de condutividade hidráulica e, portanto, mais quatzosos (areno-siltosos) e com menor capacidade de retenção.

O magnésio ocorre na vinhaça (7,84 mg/l) e nas águas de lavagem da cana (8,2 mg/l) em concentrações relativamente baixas. Nas águas amostradas no poço de "background" os valores encontrados atingem 1,4 mg/l. Entretanto, em todos os níveis piezométricos analisados, as águas mostraram-se com valores de magnésio entre 9,3 e 25,1 mg/l e, portanto, com concentrações maiores que as registradas nos efluentes infiltrados e, igualmente superiores aos valores para as águas subterrâneas na sua forma natural.

As maiores concentrações de magnésio nas águas subterrâneas estão associadas a mobilização deste íon bivalente,

pela lixiviação induzida nos processos de infiltração. Obedecendo aos princípios das atividades dos cátions, temos o potássio, monovalente assumindo posições nos argilo-minerais e mobilizando o magnésio, bivalente.

A troca catiônica é função, principal, da valência dos elementos químicos onde, quanto maior for o valor da valência, maior a preferência de troca. Cátions com raios atômicos menores (p.ex. magnésio) são preferenciais em relação aos de maiores raios (p.ex. potássio), de acordo com Nobre, de Campos e da Fontoura (1987).

O íon cálcio forma sais moderadamente solúveis a muitos solúveis, encontrando-se quimicamente em forte associação aos íons bicarbonato e carbonato.

Os valores de cálcio nas águas de lavagem da cana atingiram 104 mg/l e, na vinhaça 57,2 mg/l. Na água subterrânea de poço de "background" o cálcio alcança concentrações de 4,46 mg/l.

As amostras das águas dos piezômetros mostram valores para cálcio entre 13,6 e 38,8 mg/l, demonstrando que parte do cálcio infiltrado pode estar sofrendo adsorção ou, associou-se a bicarbonato e carbonato, precipitando e ficando retido no meio aquífero poroso. Porém, as análises obtidas das amostras dos piezômetros indicam que grande parte dos valores infiltrados do cálcio atingem as águas subterrâneas locais, evidenciando uma retenção relativamente baixa para este cátion no corpo sólido do aquífero.

Manganês

O íon manganês pode ser encontrado com os estados de valência +2 e +3, e, excepcionalmente +4, quando em condição de pH muito alto. Naturalmente, ocorre sob a forma Mn^{2+} podendo oxidar-se facilmente e formar MnO_2 .

De acordo com Custodio e Llamas (1983), o manganês pode ainda formar complexos orgânicos estáveis.

As concentrações de manganês na vinhaça atingem 6,7 mg/l e nas águas de lavagem da cana 0,79 mg/l. Na água analisada para o poço de "background", o valor para manganês chega em 0,02 mg/l.

Nos piezômetros as análises registram variações de concentrações entre 0,03 e 3,5 , mostrando o repasse deste cátion para as águas subterrâneas.

A oxidação do manganês forma manchas escuras e favorece o desenvolvimento de certas bactérias.

Ferro

O ferro pode existir nos estados de valência +2 e +3. O seu comportamento químico e solubilidade dependem da intensidade das reações de oxidação ou redução que ocorre no sistema, sendo influenciado por fatores físico-químicos e biológicos, tais como o pH, Eh, oxigênio dissolvido, dióxido de carbono, compostos orgânicos e, ainda, microorganismos, que podem afetar as condições de pH e Eh (Meneses, 1988 in: Hassuda, 1989).

As concentrações de ferro na vinhaça (14 mg/l) e nas águas

de lavagem da cana (11,3 mg/l) são, para o nosso caso, equivalentes. Na água do poço profundo de "background" os valores encontrados são inferiores a 0,12 mg/l. Para as amostras analisadas dos piezômetros, os valores das concentrações de ferro encontram-se entre 0,45 e 34 mg/l. O incremento nos valores das concentrações de ferro nos níveis piezométricos superiores Pz₁₂ e Pz₂₂, respectivamente instalados a jusante das lagoas de vinhaça e das células/tanques de decantação das águas de lavagem da cana, ocorrem devido a lixiviação das ocorrências limoníticas que se distribuem nos sedimentos da área de estudo, sendo compostas por hidróxidos e óxidos de ferro.

Os valores do pH, ácido para a vinhaça e básico para as águas de lavagem da cana, concorrem de maneira a potencializar a lixiviação limonítica da porção superior do aquífero, impondo valores de 34 mg/l (Pz₁₂) e 18 mg/l (Pz₂₂) para as concentrações de ferro total.

Já nos níveis piezométricos inferiores, relativos as mesmas localizações anteriormente vistas, as concentrações para o ferro são reduzidas para 3,66 mg/l (Pz₁₁) e 5,72 mg/l (Pz₂₁), em função, ao nosso ver, da neutralização em ambos os casos para o pH e conseqüente reincorporação dos hidróxidos e óxidos de ferro ao meio sólido aquífero.

As crostas limoníticas estão sofrendo uma migração para as porções inferiores do corpo aquífero sedimentar Bauru.

Alumínio

O íon alumínio é de difícil ocorrência em solução, sendo encontrado na forma Al^{3+} em condição de pH abaixo de 4. Acima deste valor é fortemente hidrolizável, formando hidróxido de alumínio. Em águas básicas, existe como Al_2O_4 (Custodio e Llamas, 1983).

Os valores de alumínio para as águas do poço de "background" é menor que 1,0 mg/l. Para as águas de lavagem da cana (8,54 mg/l) e para a vinhaça (7,2 mg/l) são, no presente caso, equivalentes. Nas amostras obtidas dos níveis piezométricos as concentrações do alumínio total variaram entre 1 e 52 mg/l.

O alumínio ocorre naturalmente associado as argilas, encontrando-se os maiores valores de concentração registrados nos piezômetros relacionados as relações de troca catiônica sendo, posteriormente, transferido para a água do aquífero. As maiores concentrações, entre 5,53 e 52 mg/l, estão associadas aos níveis piezométricos Pz₃₁ e Pz₃₂, com maiores condutividades hidráulicas, associadas as frações quartzosas silte e areia onde, o alumínio circula mais livremente junto com a água de percolação.

Cloreto

O ânion cloreto é, em geral, muito solúvel e estável em dissolução, precipitando dificilmente.

Este ânion não tem participação significativa nas reações de óxido-redução, não é facilmente adsorvido, forma raramente complexos importantes e participa muito pouco das reações bioquímicas (Hem, 1985).

O caráter conservativo do cloreto, que lhe confere, em termos gerais, indicações de um bom traçador, não foi diagnosticado na área de monitoramento deste estudo.

A água subterrânea do poço de "background" apresenta valor de cloreto em 25 mg/l. A vinhaça e as águas de lavagem da cana mostram valores de 800 e 130 mg/l, respectivamente. Entretanto, as águas amostradas nos piezômetros resultaram em concentrações de cloreto entre 1 a 150 mg/l.

A transferência, praticamente direta, dos altos valores analisados para a vinhaça e águas de lavagem da cana, não ocorreu.

Sulfato

Os sais de sulfato são considerados quimicamente difíceis de precipitar, sendo moderadamente a muito solúveis. Entretanto, este ânion tende a formar íons e compostos complexos (Hassuda, 1989).

Os valores de sulfato total na vinhaça chegaram a 130 mg/l e nas águas de lavagem da cana, 12 mg/l. A água do poço profundo de "background" registrou concentrações de 2 mg/l. Para as análises das amostras do sistema de monitoramento piezométrico, as concentrações de sulfato variaram entre 2 e 10 mg/l.

O repasse de sulfato para as águas subterrâneas é evidente, modificando sua qualidade natural, porém, parte do sulfato infiltrado deve ter-se imobilizado nos processos de complexação.

Fosfato

Constitui ions pouco solúveis e, em geral, precipitam sob a forma de $(PO_4)_2 Ca_3$ (fosfato de cálcio).

Os valores de fosfato para as águas de lavagem da cana (8 mg/l) são mais elevados que os obtidos para a vinhaça (3,5 mg/l). A água amostrada do poço de "background" apresentou concentração de fosfato de 0,015 mg/l. Para as águas analisadas do sistema de monitoramento por piezômetros, os valores encontrados variaram entre 0,03 e 0,38 mg/l.

Os baixos teores registrados para fosfato nas amostras dos piezômetros, encontram-se certamente relacionados a tendência deste ânion em formar ions pouco solúveis, além das baixas concentrações relativas existentes nos efluentes e, ainda, pela presença de cálcio que limita sua mobilidade.

Os compostos de fósforo reagem com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio através de adsorção por ligações covalentes (Bittencourt e Zambello Júnior, 1973).

Derivados do Ácido Carbônico

Em uma água natural existem ions CO_3^{2-} (carbonato), HCO_3^- (bicarbonato) e CO_2 (dióxido de carbono) dissolvido e, em parte como H_2CO_3 (ácido carbônico), sendo possível os seguintes equilíbrios (Custodio e Llamas, 1983):

O processo de ionização do ácido carbônico numa solução aquosa depende da temperatura e pH do meio. Considerando-se 20°C, o ácido carbônico é dominante numa solução com pH inferior a 4,4. Para soluções com pH superiores a 8,3, a forma dominante é o carbonato e, para o intervalo de pH entre 4,4 a 8,3, há o predomínio do bicarbonato (Stumm e Morgan, 1981 in: Hassuda, 1989).

Nas águas de lavagem da cana (pH entre 10,2 e 11) o carbonato é dominante com 1.760 mg/l. Para a vinhaça (pH entre 3,3 e 3,6) predomina o ácido carbônico. Na água subterrânea de "background" (pH variando de 6 a 7) o bicarbonato atinge valor de 24 mg/l. Para as análises das águas do sistema piezométrico há a ocorrência marcante de bicarbonato (valores entre 77 a 296 mg/l) e, de forma secundária, carbonato (valores de zero a 75

mg/l), este último registrado somente nos níveis Pz₁₁, Pz₃₁ e Pz₃₂.

A origem do bicarbonato nas águas subterrâneas encontra-se, ao nosso ver, relacionada a neutralização dos valores de pH tanto da vinhaça quanto das águas de lavagem da cana (respectivamente com elevadas concentrações de H_2CO_3 e CO_3^{2-}) e posterior transformação para HCO_3^- , dominante nas ocorrências das águas do sistema piezométrico.

As maiores concentrações de bicarbonato, entre 272 a 296 mg/l, estão associados aos níveis piezométricos Pz₃₁ e Pz₃₂, com maiores valores de condutividade hidráulica.

Matéria Orgânica

Na água do poço profundo de "background" as concentrações registradas para matéria orgânica encontram-se abaixo de 2 mg/l. Os valores obtidos das amostras de vinhaça e das águas de lavagem da cana indicam altíssimos teores de matéria orgânica, respectivamente 11.500 e 8.260 mg/l. Entretanto, nas análises realizadas para as águas do sistema piezométrico, os valores relatados para a matéria orgânica são baixos, entre < 2 a 2,9 mg/l.

O repasse de matéria orgânica das lagoas escavadas de vinhaça e das células de decantação das águas de lavagem da cana, encontra-se dificultadas, ao nosso ver, pela baixa mobilidade deste parâmetro no meio aquífero saturado. As altas concentrações presentes nos efluentes considerados são fixadas no meio poroso, contribuindo para a adsorção de cátions e,

conferindo um maior "efeito tampão" na estrutura do corpo sedimentar.

Hassuda (1989), atribui à redução de matéria orgânica da vinhaça, as reações de biodegradação que, atuam transformando o carbono em gás carbônico, de tal maneira que, percentualmente, a parte perdida em gás é maior.

VI.6 Qualidade Físico-Química das Águas Superficiais

O sistema hídrico superficial monitorado constitui parte da Bacia Hidrográfica do Riacho do Chimbó, sendo basicamente composto pela Represa da Guarita, Represa da Estrada e o próprio Riacho. Como já antevisto, o fluxo de base (vazão de base) do Riacho do Chimbó provém integralmente do aporte de água subterrânea (considerando-se assim também a contribuição drenada das represas), tendo, portanto, um comportamento efluente em todo o trecho avaliado (período de estiagem/inverno). As águas que contribuem para o fluxo de base do riacho e que se encontram isentas do impacto da área de disposição dos efluentes, constituem as Represas da Guarita e da Estrada e o poço de "background".

A água do poço profundo de "background" e a água da Represa da Guarita, serviram para comparações com a água analisada do Riacho do Chimbó. A análise da represa da Guarita ficou restrita aos parâmetros alumínio (4,1 mg/l), carbono orgânico total (<2 mg/l), ferro (0,17 mg/l) e manganês (0,02 mg/l).

O valor obtido para o alumínio (4,1 mg/l) na água da Represa da Guarita, ultrapassa o teor máximo admissível da Resolução CONAMA nº 20. Para os outros parâmetros avaliados não há restrição.

Os valores encontrados para a condutividade elétrica das amostras coletadas no poço de "background" variaram entre 62 e 75 micro-S/cm, estando o pH entre 6 e 7 com a temperatura mantendo-se constante em 25°C.

A Represa da Guarita, construída perpendicularmente ao eixo do Riacho do Chimbó, apresenta águas com condutividade elétrica entre 74 e 80 micro-S/cm, pH entre 6,02 e 6,99 e temperaturas oscilando entre 23 e 25°C, dados estes relativos as médias das três campanhas realizadas.

O Riacho do Chimbó teve suas águas coletadas no local de confluência com a ponte de madeira da estrada vicinal de acesso à destilaria, a cerca de 3,2 km, em trecho reto, dos locais de disposição dos efluentes. Suas águas registraram variações de condutividade elétrica entre 112 e 130 micro-S/cm, pH entre 5,7 e 6 e temperatura em torno de 17°C.

A Tabela 09, representa os dados físico-químicos das amostras de vinhaça, águas de lavagem da cana, poço de "background" e da água do Riacho do Chimbó.

PARAMETROS	VINHAÇA (1)	AGUA DE LAVAGEM DA CANA (1)	POÇO DE "BACK GROUND" (1)	RIACHO DO CHIMBÓ (1)
SODIO (2)	6,8	18,2	3,1	3,2
POTASSIO (2)	860	188	3,8	7,8
MAGNESIO (2)	7,84	8,2	1,4	3,7
CALCIO (2)	57,2	104	4,46	4,8
MANGANES (2)	6,7	0,79	0,02	0,11
FERRO (2)	14	11,3	< 0,12	3
ALUMINIO (2)	9,2	8,54	< 1	< 1
CLORETO (2)	800	130	25	10
SULFATO (2)	130	12	2	7
FOSFATO (2)	3,5	8	0,015	0,03
BICARBONATO	-	-	24	35
CARBONATO	-	1.760	-	-
NAT.ORG. (2)	11.500	8.260	< 2	6,3
pH (3)	3,3 - 3,6	10,2 - 11	6 - 7	5,7 - 6
COND.ELET.	3.760 (4)	3.440 (4)	62 - 75 (5)	112 - 130 (5)

(1) mg/l; (2) valores totais; (3) unid.pH (valores mín. e máx. de campo); (4) micro-S/cm (valores médios de campo) e (5) micro-S/cm (valores mín. e máx. de campo).

TABELA 09: Dados Físico-Químicos das Amostras de Vinhaça, Águas de Lavagem da Cana, Poço de "Background" e Riacho do Chimbó.

De uma maneira geral, observou-se um aumento dos valores das concentrações dos parâmetros analisados para a água do Riacho do Chimbó, quando comparados aos teores obtidos para o poço de "background".

O ferro total e o fosfato ultrapassaram os valores dos padrões de potabilidade para consumo humano, relacionados pela Organização de Saúde (OMS), Estado de São Paulo e Resolução CONAMA nº 20, porém, em valores bem abaixo dos registrados para as águas subterrâneas (TABELA 10).

PARAMETROS (mg/l)	OMS (1)	ESTADO DE SÃO PAULO (2)	RESOLUÇÃO CONAMA (3)	RIACHO DO CHIMBÓ
FERRO	1	0,3	0,3	3
FOSFATO	-	-	0,025	0,035

(1) Organização Mundial de Saúde (OMS), 1971-Concentração Máxima Permissível na Água a ser Introduzida no Sistema de Distribuição;
 (2) Decreto Estadual nº 12.486 de 20/10/78, NTA-60, Padrões Aplicáveis a Área de Poços;
 (3) Resolução CONAMA nº 20, de 18/06/86;

TABELA 10: Parâmetros Químicos que Excederam Padrões de Potabilidade para a Água Superficial.

Para o ferro, o valor padrão referido pelo Estado de São Paulo e pela Resolução CONAMA nº 20 é de 0,3 mg/l e, a Organização Mundial de Saúde recomenda 1 mg/l, como teor máximo admissível. Na água do Riacho do Chimbó, o valor para ferro alcança 3 mg/l.

Com relação ao fosfato, a Resolução CONAMA nº 20, refere-se ao valor máximo de 0,025 mg/l. Para a água superficial amostrada no Riacho do Chimbó, o valor de fosfato chega a 0,035 mg/l.

Entretanto, as alterações hidroquímicas não ficaram restritas apenas aos parâmetros acima destacados. Os valores de condutividade elétrica monitorados no poço de "background" (entre 62 e 75 micro-S/cm) e na água da Represa da Guarita (entre 74 e 80 micro-S/cm), são inferiores aos registrados nas águas do Riacho do Chimbó (entre 112 e 130 micro-S/cm). Este aumento dos valores de condutividade elétrica indicam a transferência de constituintes dos efluentes considerados para as águas do riacho

monitorado.

Os íons encontrados com valores de concentração superiores aos obtidos para o poço de "background" e para a água da Represa da Guarita e que, conferiram um caráter de maior condutividade elétrica à água do Riacho do Chimbó foram: sódio, potássio, magnésio, cálcio, manganês, ferro, sulfato, fosfato e bicarbonato.

A Represa da Estrada localiza-se em uma cota topograficamente mais destacada que a área dos tanque de vinhaça e das águas de lavagem da cana, encontrando-se na margem direita da bacia de drenagem do Riacho do Chimbó. Suas águas mostram-se, excentricamente, com valores de condutividade elétrica entre 300 e 350 micro-S/cm, pH variando entre 6,02 e 7,35 e temperaturas oscilando de 21 a 21,3°C (dados relativos as três campanhas de amostragem). Estes altos valores relativos de condutividade elétrica das águas da Represa da Estrada podem ser entendidos em função deste corpo hídrico superficial encontrar-se completamente circundado por área agrícola com plantio de cana-de-açúcar e, portanto, sujeito a contribuições da vinhaça aspergida em excesso. Os valores mais baixos registrados nas medições de temperatura destas água (entre 21 e 21,3°C) vêm a corroborar a asserção acima proposta onde, o processo de asperção por canhão hidráulico seria responsável pela redução da temperatura da vinhaça utilizada para a fertirrigação em contato direto com as temperaturas ambientais mais baixas.

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O acelerado processo de crescimento experimentado pelos países desenvolvidos e em desenvolvimento, elevou consideravelmente as demandas de água para abastecimento humano, industrial e para irrigação. As restrições impostas ao uso da água pela contaminação e as preocupações ambientais vêm criando problemas de difícil solução em muitas regiões.

De acordo com o DAEE (1988), apesar dos avanços observados na redução das cargas poluidoras industriais nos últimos anos, a insuficiência desta remoção nos despejos urbanos e a concentração regional da poluição vêm degradando substancialmente os recursos hídricos, comprometendo seriamente a sua utilização para fins múltiplos.

Não são muitos os trabalhos no Brasil que tratam da problemática de poluição/contaminação das águas subterrâneas e muito menos os que descrevem as interrelações entre os domínios aquíferos e as águas superficiais, abordando o repasse de vazões e cargas poluidoras.

O presente trabalho pretendeu prover o aprimoramento das técnicas utilizadas para caracterizar os impactos gerados pela infiltração das águas de lavagem da cana e vinhaça nos domínios do Aquífero Bauru, buscando-se determinar as alterações físico-químicas impostas as águas subterrâneas e superficiais, destacando-se a interdependência entre estas e a necessidade de entendê-las de forma não isolada e sim, como componentes do sistema de recursos hídricos.

A disposição agrícola da vinhaça, associada ou não aos descartes eventuais das águas de lavagem da cana, envolve amplas e distintas metodologias que podem ser resumidamente observadas na Figura 16, não cabendo aqui descrevê-las em pormenores.

Evidentemente, as particularidades de manejo de cada sistema operacionalizado, associado aos condicionantes geoambientais que, encerram uma maior ou menor vulnerabilidade do meio aquífero, impõem a necessidade de se administrar um criterioso e continuado controle ambiental, em detrimento inclusive das características ótimas produtivas do sistema.

Os volumes produzidos de vinhaça justificam, ao nosso ver, as preocupações retromencionadas, merecendo hoje uma atenção maior quanto a disposição em lagoas/tanques escavados de armazenamento/repasse.

Com relação aos sistemas de operação para lavagem da cana-de-açúcar, mesmo considerando sistemas semi-fechados em tanques de concreto, aventamos a possibilidade de infiltração, principalmente quando a remoção da porção sólida decantada dá-se em operações envolvendo caminhões e máquinas pesadas. As pressões impostas ao terreno de entorno do tanque e as amarrações de concreto, promovem pequenos recalques e rachaduras (as máquinas podem operar dentro do tanque). As rachaduras são produzidas também pelo alívio das pressões resultantes do esvaziamento dos tanques e potencializadas quando estes permanecem vazios. Deve-se, ainda, somar os naturais efeitos das ações intempéricas.

Figura 16: Representação Esquemática das Várias Opções de Disposição Agrícola da Vinhaça (Glória e Orlando Filho, 1982).

Este conjunto de observações permitiu incentivar a realização deste trabalho que, certamente servirá para melhor compor as normas técnicas referentes a construção de tanques de armazenamento/repasso de vinhaça e dos tanques que compõem os sistemas de lavagem de cana-de-açúcar, dando continuidade aos levantamentos conduzidos pelo Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS - IG - USP e pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB.

VIII. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos, pode-se considerar que a metodologia de trabalho proposta teve um resultado satisfatório na avaliação dos impactos produzidos pela infiltração e percolação de vinhaça e das águas de lavagem da cana, nas águas subterrâneas e superficiais da área monitorada.

O sistema piezométrico instalado em dois níveis, juntamente com os dados potenciométricos do poço de "background", possibilitaram entender as relações horizontais e verticais de fluxo e avaliar as velocidades de percolação, bem como definir o forte incremento no nível freático local por efeito da infiltração.

Os resultados das análises físico-químicas obtidas para as amostras do poço de "background", piezômetros e para as águas superficiais, permitiram reconhecer a ocorrência de alteração da

qualidade das águas subterrâneas e superficiais locais a partir da infiltração dos efluentes considerados.

Sob condições naturais, as águas subterrâneas mostram-se como cloretadas cálcicas, de acordo com o diagrama de Piper, sofrendo evolução para bicarbonatadas cálcicas e magnesianas e para bicarbonatadas sódicas, sob impacto dos efluentes.

As alterações hidroquímicas são função da natureza multicomposicional dos efluentes considerados e da dinâmica interativa com o meio poroso Aquífero Bauru, onde, a transferência dos constituintes químicos para as águas subterrâneas e superficiais pode ocorrer pela presença do composto ou elemento químico nos efluentes ou, pela mobilização induzida de íons existentes no corpo sólido do aquífero.

De uma maneira geral, os valores mais elevados de condutividade hidráulica sugerem estar relacionados a valores igualmente altos da condutividade elétrica das águas subterrâneas amostradas. Este fato indica a natureza mais quartzosa e quimicamente menos interativa das frações granulométricas areia e silte, onde as velocidades de acesso dos contaminantes são facilitadas.

Para as águas subterrâneas, o manganês (entre 0,03 e 3,5 mg/l), o ferro (entre 0,45 e 34 mg/l), o alumínio (entre 1 e 52 mg/l) e o fosfato (entre 0,030 e 0,38 mg/l), ultrapassaram os valores para consumo humano referidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS); Decreto nº 12.486 de 20/10/78, NTA-60, para o Estado de São Paulo e Resolução CONAMA nº 20 de 18/06/86.

Em relação as águas superficiais, os valores de ferro total (3 mg/l) e fosfato (0,035 mg/l), ultrapassaram os padrões

de potabilidade para consumo humano, relatados pela Organização Mundial de Saúde (OMS); Decreto nº 12.486 (20/10/78) do Estado de São Paulo e Resolução CONAMA nº 20 de 18/06/86, porém em valores bem abaixo dos registrados para as águas subterrâneas impactadas.

O Estado de São Paulo responde atualmente por cerca de 70% da produção nacional de álcool sendo, portanto, detentor de um potencial poluidor (vinhaça e águas de lavagem da cana), incorporado a esta produção, equivalente a seis vezes a carga de esgotos produzidos por sua população.

Em muitos casos, a atividade industrial alcooleira encontra-se desenvolvida sobre as áreas de recarga dos principais aquíferos do estado.

O Aquífero Bauru, somente no estado de São Paulo, funciona como corpo de transferência da carga poluidora de cerca de 62 indústrias açúcar alcooleiras.

Este conjunto de informações certamente servirá para melhor compor as normas técnicas referentes a construção de lagoas escavadas de armazenamento/repasso de vinhaça e das células de decantação das águas de lavagem da cana, destacando-se a interdependência entre as águas subterrâneas e superficiais e a necessidade de entendê-las de forma conjunta, como componentes do sistema de recursos hídricos.

As particularidades de manejo de cada sistema operacionalizado de circulação, estocagem, repasse e destino final dos efluentes considerados, associados aos condicionantes geoambientais que, encerram um maior ou menor risco ao meio aquífero, impõem a tendência de se administrar um criterioso e continuado controle, em detrimento das características produtivas

do sistema.

IX. BIBLIOGRAFIA

- ALBUQUERQUE, G.A.C. de & MARINHO, M.L. - 1984 - Efeito Cumulativo de Doses de Vinhaça e Adubação Mineral Sobre Socas de Cana-de-Açúcar em Alagoas. Cadernos Planalsulcar. Piracicaba - SP, p. 11-22.
- ALMEIDA, F.F.M. de - 1964 - Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. Bol. Inst. Geogr. Geol., São Paulo, (41): 167-263.
- ALMEIDA, F.F.M. de & BARBOSA, O. - 1953 - Geologia das Quadriculas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo. Rio de Janeiro, DNPM-DGM. 96p. (Bol. No 143).
- ALMEIDA LIMA, V. - 1969 - Possibilidades de Reaproveitamento Econômico dos Vários Tipos de Resíduos. Simpósio Sobre Resíduos da Indústria de Açúcar. São Paulo, SP. CETESB.
- ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S.; BUSTRICH, C.A.; PONÇANO, N.L.; HASUI, Y. & ALMEIDA, F.F.M. - 1980 - Geologia do Oeste Paulista e Áreas Fronteiriças dos Estados de Mato Grosso do Sul e Paraná. In: Mesa Redonda "A Formação Bauru no Estado de São Paulo e Regiões Adjacentes". Coletânea de Trabalhos e Debates. SBG, São Paulo, p. 31-43.
- AMARAL E SILVA, C.S. do - 1982 - Confinamento de Vinhoto em Áreas de Sacrificio. In: "Encontro Técnico Sobre Problemas e Oportunidades no Aproveitamento de Vinhoto". Rio de Janeiro, RJ, 29p.
- ARID, F.M. - 1973 - Comportamento Espacial da Formação Bauru na Região Norte-Occidental do Estado de São Paulo. R. Bras. Geociênc., São Paulo, 3 (1): 23-35.
- ARID, F.M.; CASTRO, P.R.M. & BARCHA, S.F. - 1970 - Estudos Hidrogeológicos no Município de São José do Rio Preto, SP. Bol. Soc. Bras. Geol. São Paulo, 19 (1): 43-69.
- BERTON, R.S.; GERALDI, R.N. & VAN RAIJ, B. - 1983 - Resíduos da Indústria Alcooleira como Fontes de Potássio em Experimento de Casa de Vegetação. R. Bras. Ciênc. do Solo. Rio de Janeiro, RJ, 7: 61-64.

- BITTENCOURT, V.C. & ZAMBELLO Jr., E. - 1973 - Comportamento do Fósforo em Solos Tropicais. Isotermas de Absorção. Bol. Científico do CENA. Piracicaba, SP, 12: 0-23.
- BONAPARTE, R. - 1982 - Hazardous Waste-Soil Interactions - Preliminary Report. Unpublished, Woodward - Clyde Consultants. Professional Development Program Report.
- BOUWER, H. - 1979 - Groundwater Hydrogeology - International Student Edition. McGraw-Hill, Inc.. Kosaido Printing Co., LTD, Tokyo, Japan.
- BRAILE, P.M. e CAVALCANTE, J. E. W. A. - 1979 - Manual de Tratamento de Aguas Residuárias Industriais. CETETB. São Paulo, SP, 764p.
- BRANDT NETO, M. - 1977 - Estratigrafia da Formação Bauru na Região do Baixo Tietê. São Paulo, SP, USP, Instituto de Geociências. 74p. (Dissertação de Mestrado).
- BRANDT NETO, M. - 1984 - O Grupo Bauru na Região Centro-Norte do Estado de São Paulo. São Paulo, SP, USP, Instituto de Geociências. V1. 106p. & V2. 61p. (Tese de Doutorado).
- BUENO, R. - 1980 - Pró-Alcool: Rumo ao Desastre. Editora Vozes. Segunda Edição. Petrópolis - Rio de Janeiro.
- CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A. da & GERALDI, R.N. - 1983 - Características Químicas e Físicas de Solo que Recebeu Vinhaça por Longo Tempo. Bol. Técnico do IAC. Campinas, SP, 76: 30p.
- CAMARGO, O.A. de ; VALADARES, J.M.A. da; BERTON, R.S. & TEOFILO SOBRINHO, J. - 1987 - Aplicação de Vinhaça no Solo e Efeito no Teor de Nitrogênio, Fósforo e Enxofre Inorgânicos e no de Alguns Metais Pesados. Bol. Científico do IAC, 8, 15p.
- CAMPOS, H.C.N.S. - 1987 - Contribuição ao Estudo Hidrogeoquímico do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. São Paulo, SP, USP, Instituto de Geociências. (Dissertação de Mestrado).
- CARVALHO, M. de. - 1982 - Algumas Observações Sobre a Transmissividade em Aquíferos da Formação Bauru. Rev. do Inst. Geol. São Paulo, 3 (1).
- CAVALCANTE, I.N. & SABADIA, J.A.B. - 1992 - Potencial Hidrico Subterrâneo: Um Bem Mineral Vital Ameaçado Pela Poluição Antrópica. Revista de Geologia do DEGED/UFC. Fortaleza, Ce, p. 115 - 124.
- CENTURION, R.E.B. & PECEBON, C.M. - 1982 - Confinamento de Vinhoto em Areas de Sacrificio. Encontro Técnico Sobre Problemas e Oportunidades no Aproveitamento de Vinhoto. Rio de Janeiro, RJ.

- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - 1977 - Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano. São Paulo, SP. 198p.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - 1988 - Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água. São Paulo, SP. 150p.
- CLEARY, R. W. - 1989 - Fundamental Concepts in Groundwater Pollution and Hydrology. Apostilha Disciplina Modernas Técnicas de Análise de Poluição de Água Subterrânea. IG/USF - Pós-Graduação Hidrogeologia. São Paulo.
- COLETI, J.T.; LORENZETTI, J.M.; GASPARINI, C.T.; DEMATTE, J.L.I. & RIBEIRO de FREITAS, O.G. - 1983 - Efeito da Aplicação de Vinhaça nas Propriedades dos Solos da Usina São José da Estiva, Macatuba. Açúcar e Alcool e Subprodutos, Piracicaba, SP, (1): 12-17.
- CUNHA, R.C.A. da; COSTA, A.C.S. da; MASET FILHO, B. & CASARINI, D.C.P. - 1987 - Effects of Irrigation with Vinasse and the Dynamics of its Constituents in the Soil. Physical and Chemical Aspects. Water Science and Technology. In: 13th IAWPRC Biennial International Conference. Salvador, BA, p. 153-163.
- CUSTODIO, E. e LLAMAS, M. R. - 1983 - Hidrologia Subterranea. Directores de Edición. Segunda Edición Corregida. Ediciones Omega, S/A - Barcelona - España. Tomos I e II.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - 1972 - Estudo de Águas Subterrâneas: Avaliação Preliminar - São Paulo, SP.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - 1974 - Estudo de Águas Subterrâneas: Região Administrativa 6 - Ribeirão Preto, SP, Geopesquisadora Tahal, 2v.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - 1976 - Estudo de Águas Subterrâneas: Regiões Administrativas 7, 8 e 9 - Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba. São Paulo, ENCO, 4v.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - 1979 - Estudo de Águas Subterrâneas: Regiões Administrativas 10 e 11 - Presidente Prudente e Marília. São Paulo, ENCO, 3v.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - 1988 - Água Subterrânea: Reserva Estratégica. Rev. Águas e Energia Elétrica. São Paulo, 5(13).

- FREITAS, S. dos S. - 1985 - Mineralização e Imobilização do Nitrogênio em Solo Suplementado com Torta de Filtro de Usina de Cana e Carbonato de Cálcio. Piracicaba, SP, USP, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 64p. (Dissertação de Mestrado).
- FOSTER, S.S.D. - 1987 - Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability Pollution Risk and Protection Strategy. Proc. Intl. Conf. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Noorwiok, The Netherlands.
- GONZAGA DE CAMPOS, E.F. - 1905 - Reconhecimento da Região Compreendida entre Bauru e Itapura (Estrada de Ferro Noroeste do Brasil). São Paulo, SP, Tip. Ideal. 40p.
- GLOEDEN, E.; CUNHA, R.C.A. da; FRACCAROLI, M.J.B. & CLEARY, R.W. - 1990 - The Behaviour of Vinasse Constituents in the Unsaturated and Saturated Zones in the Botucatu Aquifer Recharge Area. International Seminar of Pollution, Protection and Control of Groundwater. Porto Alegre, RS. p. 147-157.
- GLORIA, N. & ORLANDO FILHO, J. - 1982 - Aplicação de Vinhaça: Um Resumo e Discussão Sobre o Que Foi Pesquisado. Rev. Açúcar e Alcool. São Paulo.
- GRANZIERA, M. L. M. - 1993 - Direito de Aguas e Meio Ambiente. Editora Icone - São Paulo - SP.
- GUIGUER JUNIOR, N. - 1987 - Poluição das Aguas Subterrâneas Causada por Aterros Sanitários: Uma Abordagem Matemático-Experimental. São Paulo, SP, USP, Escola Politécnica. 250p. (Dissertação de Mestrado).
- HADDAD, J.F. - 1987 - Monitoramento: Aspectos Sanitários e Geotécnicos. Simpósio Sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Rio de Janeiro, RJ. p. 121-151.
- HASSUDA, S. - 1989 - Impactos da Infiltração de Vinhaça de Cana no Aquífero Bauru. São Paulo, SP, USP, Instituto de Geociências. 92p. (Dissertação de Mestrado).
- HASSUDA, S.; REBOUÇAS, A.C. & CUNHA, R.C.A. da - 1991 - Aspectos Qualitativos da Infiltração da Vinhaça de Cana no Aquífero Bauru. Rev. Instituto Geológico. São Paulo, SP. p. 05-20.
- HASSUDA, S.; MENDES, J.M.B.; REBOUÇAS, A.C.; CUNHA, R.C.A. & GLOEDEN, E. - 1991 - Influência dos Vários Tipos de Disposição de Vinhaça na Qualidade da Água Subterrânea. 3º Encontro Nacional de Estudos Sobre o Meio-Ambiente. Londrina, PR. p. 510-517.

- HEM, J.D. - 1985 - Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Washington. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2254: 263p.
- HESPANHOL, I. - 1978 - Os Efeitos do Programa Nacional do Alcool Sobre o Meio-Ambiente. São Paulo, SP. Rev. DAEE. 22p.
- HESPANHOL, I. - 1979 - Efeitos Ambientais do Programa Nacional do Alcool. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. Manaus, AM, 22: 1-41.
- HIRATA, R. C. A.; BASTOS, C. R. A.; ROCHA, G. A.; GOMES, D. C.; IRITANI, M. A. - 1990 - Groundwater Pollution Risk and Vulnerability Map of the São Paulo State - Brasil. International Seminar of Pollution, Protection and Control of Groundwater. Porto Alegre - Brasil. p. 236-246.
- HSU, P.H. - Fixation of Phosphate by Aluminum and Iron in Acid Soils. Soil Science, 99(6): 398-402.
- JOHNSON DIVISION, Universal Oil Products Co. - 1978 - Água Subterrânea e Poços Tubulares. Terceira Edição Revisada do Original Ground Water and Wells. CETESB. São Paulo.
- MAZZA, J.A. - Variações em Algumas Propriedades de Solos com Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp.*) Tratados com Doses Maciças de Vinhaça. Piracicaba, SP, USP, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 102p. (Dissertação de Mestrado).
- MAGRO, J.A & GLORIA, N.A. da - 1977 - Adubação de Soqueira de Cana-de-Açúcar com Vinhaça Complementada com Nitrogênio e Fósforo. Brasil Açucareiro. Rio de Janeiro, 90: 31-34.
- MENDES, J. M. B. - 1987 - Técnicas Geofísicas Aplicadas no Mapeamento e Monitoramento de Poluição e Contaminação de Águas Subterrâneas. São Paulo, SP, USP, Instituto de Geociências. 196p. (Tese de Doutorado).
- NOBRE, M.M.M.; CAMPOS, T.M.P. de & FONTOURA, S.A.B. da - 1987 - Considerações Sobre o Efeito Tampão no Fluxo de Poluentes Em Solos Argilosos. Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Rio de Janeiro, RJ. p. 77-91.
- NUNES, M.R.; VELLOSO, A.C.X. & LEAL, J.R. - 1981 - Efeito da Vinhaça nos Cátions Trocáveis e Outros Elementos Químicos do Solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, DF, 16: 171-176.
- NUNES, M.R.; LEAL, J.R. & VELLOSO, A.C.X. - 1982 - Efeito da Vinhaça na Lixiviação de Nutrientes do Solo; Potássio, Cálcio e Magnésio. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, DF, 17: 371-374.

- OLIVEIRA, E. - 1992 - Contaminação de Aquíferos por Hidrocarbonetos Provenientes de Vazamentos de Tanques de Armazenamento Subterrâneo. São Paulo, SP, USP, Instituto de Geociências. 112p. (Dissertação de Mestrado).
- ORLANDO FILHO, J. - 1981 - Sistemas de Aplicação de Vinhaça em Cana-de-Açúcar. Açúcar e Alcool. São Paulo, (1): 28-32.
- ORLANDO FILHO, J.; SILVA, G.M. de A. & LEME, E.J. de A. - 1983 - Utilização Agrícola dos Resíduos da Agricultura Canavieira. Rev. Nutrição e Adubação de Cana no Brasil. Piracicaba, SP, SEPROG-PLANALSUCAR. 1ª Edição, p. 229-264.
- PARIZOTTO, J.A. - 1993 - Auditoria Ambiental. Meio Ambiente. Rev. Rochas de Qualidade. Ed. 115, Out./Nov./Dez. p. 99-102.
- PERCEBON, C.M. & CUNHA, R.C. de A. - 1985 - Análise da Utilização da Vinhaça Concentrada na Fertirrigação da Cana-de-Açúcar. 13º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Maceió, AL. 7p.
- PERCEBON, C.M. & VALLE DO AMARAL, L.A. - 1985 - Avaliação da Qualidade das Águas de Lavagem de Cana Recicladas em Duas Usinas do Estado de São Paulo. 13º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Maceió, AL.
- POMPEU, C. T. - 1976 - Regime Jurídico de Polícia das Águas Públicas, 1. Polícia de Qualidade, São Paulo, CETESB.
- PRO-MINERIO - 1981 a - Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. SP, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, Promocet, 2 Volumes.
- PRO-MINERIO - 1981 a - Mapa Geológico do Estado de São Paulo. SP, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, Promocet, V. I.
- REBOUÇAS, A. da C. - 1976 - Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia do Paraná. São Paulo, SP, USP, Instituto de Geociências. 143p. (Livre Docência).
- REBOUÇAS, A. da C.; BATISTA, R.P.; HASSUDA, S.; CUNHA, R.C. de A. & POPPE, L.P. - 1986 - Efeitos da Infiltração de Vinhoto de Cana no Aquífero Bauru - Resultados Preliminares. 4º Congresso da ABAS, Brasília, DF, p. 183-191.
- RODELLA, A.A.; ZAMBELO JUNIOR, E. & ORLANDO FILHO, J. - 1983 - Effects of Vinasse Added to Soil on pH and Exchangeable Aluminum Content. 18º Congress of International Society of Sugar Cane Technologists, La Habana. Proceedings. p. 189-214.

- RUEDA, J.R.J.; MATTOS, J.T. de; TEIXEIRA, J.A.; MALAGUTTI FILHO, W.; RIGO JR. L. & ELIS, W.R. - 1991 - Controle Geoambiental da Irrigação com Efluentes da Indústria Canavieira. 3o Encontro Nacional de Estudos sobre Meio Ambiente. Londrina, PR, p. 22-27.
- SABADIA, J.A.B. - 1990 - Aspectos Geológicos e Hidrogeológicos do Grupo Bauru e Considerações de Vulnerabilidade em Relação ao Uso Agrícola da Vinhaça - Centro Norte de São Paulo. Seminários Gerais I. São Paulo, SP, USP, Instituto de Geociências. 20p.
- SABADIA, J.A.B. - 1990 - Os Principais Efluentes das Usinas de Cana-de-Açúcar: Cargas Poluidoras, Tratamentos e Aproveitamentos. Seminários Gerais I. São Paulo, SP, USP, Instituto de Geociências. 30p.
- SILLEM, L.G. & MARTELL, A.E. - 1964 - Stability constants of metal-iron complexes. Chemical Society, Special Publication. London, 17: 754p.
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FULFARO, V.J. & SOBREIRO NETO, A.F. - 1980 - Ensaios de Caracterização Estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo; Grupo Bauru. Rev. Bras. de Geoc., São Paulo, SP, 10(3): 177-185.
- STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. - 1986 - 17th ed., American Public Health Association, AWWA, WPCF, Washington, DC.
- SUGUIO, K. - 1980 a - Fatores Paleambientais e Paleoclimáticos e Subdivisões Estratigráficas do Grupo Bauru. Mesa Redonda. A Formação Bauru no Estado de São Paulo e Regiões Adjacentes. Coletânea de Trabalhos e Debates. São Paulo, SP, SBG, p. 15-30 (Publicação Especial, 7).
- SUGUIO, K. - 1980 b - Rochas Sedimentares: Propriedades, Gênese e Importância Econômica. Editora Edgard Blücher LTDA. E Editora da Universidade de São Paulo - São Paulo.
- TODD, D. K. - 1959 - Hidrologia de Águas Subterrâneas. Tradução do Livro Ground Water Hydrology. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo.
- VALSECHI, O. & GOMES, F.P. - 1954 - Solos Incorporados com Vinhaça e Seu Teor em Bases. Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, SP, 1: 136-158.
- VAN RAIJ B. - 1969 - A Capacidade de Troca de Cátions das Frações Orgânica e Mineral em Solos. Bragantia. Campinas, SP, 28(8): 85-111.

VISCONTI, O.; OSTROVISKI, C.M.; GIMENEZ, P.C. & SALLES, M. - 1981
- Visão Atual da Problemática do Vinhoto e como Superá-la.
Anais do 2º Congresso Nacional da STAB, Rio de Janeiro, RJ, 1:
283-296.

WENTWORTH, C. K. - 1922 - A Scale of Grade and Class Terms for
Clastic Sediments - J. Geol., 30: 377-392.

WUTKE, A.C.P. & CAMARGO, O.A. - 1972 - Adsorção e Troca Iônica.
Elementos de Pedologia. Polígono. São Paulo, SP, p. 125-147.