

# SELEÇÃO DE UMA ÁREA PARA UM ATERRO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS COM BASE NO MÉTODO RIA E SEUS INDICADORES GEOAMBIENTAIS

Selecting an industrial waste disposal area based on the RIA Method and its geo-environmental indicators

Jayme de Oliveira Campos\*

**RESUMO** – O problema ambiental relacionado à disposição de resíduos industriais apareceu nos últimos anos como uma prioridade, tanto para o poder público, quanto para a sociedade civil organizada. O presente trabalho insere-se no contexto dos propósitos do Consórcio Intermunicipal das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba e Capivari e da Prefeitura Municipal de Piracicaba, que visam contribuir para a implantação de alternativas de destinação viáveis, do ponto de vista ambiental e econômico, para os resíduos gerados pela indústria da região. Tendo em vista as carências existentes no que concerne à estocagem de resíduos perigosos, optou-se por uma solução regional. A seleção preliminar de áreas prioritárias foi realizada pela utilização de um “software” de planejamento e de uso do solo, o RIA – Resource, Information and Analysis. Este processo tem por objetivos análises ambientais específicas, pelo processando de um banco de dados, o qual é estruturado a partir de informações obtidas do inventário ambiental da área em estudo. Neste trabalho, foram enfatizados aspectos relativos às questões geotécnicas e geoambientais do projeto.

**SYNOPSIS** – The environmental questions concerned to waste deposition, appeared in recent years, as a priority issue to the government as well as to the civil organizations. This paper is inserted within the Intermunicipal Consortium of both the Piracicaba and Capivari rivers basins and the Town Hall of Piracicaba proposals, with the aim of contributing to implement viable destination alternatives in conformity with environmental and economical requirements, to waste generated from regional industries. In virtue of the existing needs referring to dangerous waste storage, a regional solution was adopted. The preliminary selection of priorities areas was achieved through the utilisation of a planning and the use of the soil software, the RIA – Resource, Information and Analysis. This process aims at specific environmental analysis, through a data processing procedure, which is structured, starting from the obtained information related to the environmental inventory of the respective area in study. In this paper, aspects regarding geo-technical and geo-environmental questions of the problem were both enhanced.

## 1 – INTRODUÇÃO

As bacias dos rios Piracicaba e Capivari (Figura 1) ocupam uma área de 14.400 km<sup>2</sup> abrangendo, total ou parcialmente, 48 municípios paulistas e 5 mineiros. Nesses municípios ocorrem cidades da maior relevância no contexto nacional, tanto no que se refere à população (cerca de 3,4 milhões em 1995), quanto à sua expressividade econômica.

---

\* D. Sc, Professor do Programa de Pós-Graduação em Geociências, Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente.

Professor Voluntário no Departamento de Planejamento Territorial, Laboratório de Planejamento Municipal, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP - Campus de Rio Claro.

E-mail: vulpian@claretiananas.com.br



No setor agro-industrial, atividades agrícolas de grande dinamismo baseiam-se em modernas práticas de plantio e colheita, onde ganham maior destaque culturas de cana de açúcar para insumos de açúcar e álcool e de cítricos utilizados no processamento de sucos destinados ao mercado externo.

Ambos os setores produtivos mencionados desenvolvem-se com o apoio de uma rede terciária de serviços bem estruturada, capaz de garantir padrões de renda e qualidade de vida à população regional em níveis significativamente mais elevados do que a média do país.

O inventário dos resíduos gerados, visando a elaboração dos Estudos de Impacto Ambiental-Relatório de Impacto de Meio Ambiente (EIA-RIMA) para o aterro industrial de Piracicaba, foi efetuado entre 1994 e 1995. Visitaram-se cerca de 30 indústrias representativas, produtoras da maioria dos resíduos, localizadas nos municípios de Piracicaba, Limeira, Americana e Rio Claro. A geração nas indústrias visitadas totalizava anualmente cerca de 2.800 e 125.000 toneladas de resíduos perigosos (Classe I) e não inertes (Classe II), respectivamente (Norma 10.004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT).

O aterro poderá servir às indústrias visitadas, prevendo-se portanto que os resíduos a serem dispostos serão aqueles que foram inventariados. Contudo, este aterro poderá vir a ser utilizado por outras indústrias não inventariadas. Naturalmente, não há como garantir que todas as indústrias venham a utilizar o aterro, não se prevendo que isto conduza a uma alteração do perfil final dos resíduos.

Tratando-se de um empreendimento localizado e fisicamente limitado a uma área com características ambientais bem definidas, a metodologia escolhida e empregada para a identificação e valoração dos impactos foi a matricial. Em linhas gerais, esta metodologia resulta do cruzamento entre os potenciais das ações do empreendimento com os componentes ambientais, identificando-se assim os impactos previstos e suas intensidades. A análise dos impactos é feita em seguida, de maneira a compatibilizar a intensidade dos mesmos com o inventário ambiental e o empreendimento, como um todo.

## **2 – RESÍDUOS GERADOS E SUA DESTINAÇÃO**

Entre os resíduos gerados estão:

- a) os lodos de estações de tratamento de efluentes (cerca de 48% do total de resíduos gerados);
- b) as borras;
- c) as tortas de filtro;
- d) as varreduras de áreas produtivas;
- e) as lamas de retíficas.

Há ainda quantidades consideráveis de outros resíduos contaminados com óleos, as resinas e os solventes, os óleos e os líquidos de refrigeração, entre outros. No que se refere aos efluentes, as suas características ou as limitações do sistema de tratamento existente propiciam a geração de lodos potencialmente contaminados, em geral com metais pesados ou compostos químicos. Nesses casos são classificados como resíduos perigosos, ou seja, Classe I (Norma 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT; Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental, CETESB, 1993).

As borras são normalmente originadas como resíduos não aproveitáveis do processo de pintura. A torta de filtro refere-se ao resíduo gerado pelo processo de recuperação de óleos que contamina o material filtrante durante a filtração. A lama de retífica é originada durante o processo de recuperação do líquido geralmente oleoso, utilizado para evitar o aquecimento das peças retificadas. A variação da área de produção refere-se aos resíduos coletados durante a limpeza das plantas industriais, os quais podem conter produtos que levam a classificá-los como Classe I.

Quanto aos resíduos Classe II, cerca de 55% são areias e escórias geradas por diversas indústrias de fundição (Campos *et al.*, 1993). As areias são utilizadas no processo de soldagem de peças e são consideradas como resíduos não inertes pela presença de metais, como o ferro, e de resinas que podem conter compostos químicos passíveis de lixiviação, como o fenol.

As fundições normalmente também geram escórias quando se funde o metal utilizado como matéria-prima antes da moldagem. Elas consistem de materiais não metálicos provenientes dos insumos utilizados no processo e podem conter concentrações de metais pesados.

O lodo produzido pelo tratamento de efluentes líquidos de indústrias corresponde a 29,7% dos resíduos Classe II. Nesse caso não se trata de resíduos perigosos, na medida em que não contêm concentrações significativas de contaminantes. Todavia, os testes de laboratório indicam que os lodos não podem ser classificados como inertes, ou seja, Classe III. São geradas ainda sucatas de metais ferrosos (5,8%) que provavelmente, em sua maior parte, podem ser comercializadas, e uma série de outros resíduos em menor quantidade.

Sabe-se que os dispositivos existentes para o tratamento e para uma disposição final adequada dos resíduos são insuficientes frente às dimensões do parque produtivo regional. Assim, o destino dos resíduos Classe I eram os seguintes:

- a) estocados em tambores (55%);
- b) estocados em sistemas diversos, entre eles caçamba e granel (16,5%);
- c) dispostos em aterros industriais pertencentes às próprias indústrias (15%);
- d) transformados, geralmente por incineração (13,5%).

O fato de 71,5% dos resíduos produzidos estarem estocados (itens a e b) é o resultado da falta de uma solução apropriada para a disposição de resíduos Classe I na região. Limeira é o único município da região que possui um aterro municipal onde é permitida a co-disposição de resíduos industriais, desde que aprovado pelos órgãos competentes de controle ambiental, mas atende exclusivamente a resíduos Classe II. Algumas empresas vêm utilizando instalações de terceiros, enviando os seus resíduos para localidades fora das bacias anteriormente mencionadas.

### **3 – METODOLOGIA**

#### **3.1 – Considerações gerais**

A idéia da seleção de uma área para a destinação de resíduos industriais na região das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá nasceu no momento em que o Consórcio Intermunicipal das Bacias citadas estendeu a cooperação com a França, no ano de 1994, para a gestão dos resíduos sólidos industriais, que anteriormente considerava apenas a gestão de recursos hídricos. Iniciou-se então um importante trabalho de parceria com a Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) e as indústrias da região, representadas pela Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP). Optou-se então pela realização de um Plano Diretor de Resíduos Sólidos Industriais, no qual, entre os diversos equipamentos de tratamento necessários, previa-se a existência de um aterro para resíduos industriais (Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, 1997).

A fase de escolha da área para a Central de Tratamento contou com a participação da Comissão de Resíduos, criada pela Prefeitura Municipal de Piracicaba. Nesta comissão estavam representados diversos segmentos da sociedade civil e dos poderes públicos, ou seja, os poderes Executivo e Legislativo Municipal, o Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, as Universidades, os Órgãos de Controle Ambiental (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB), as Sociedades Ambientalistas Regionais e os Empresários. Esta Comissão tinha responsabilidades deliberativas sobre o desenvolvimento do projeto, de tal forma que, embora

este fosse um empreendimento da iniciativa privada, atendessem também às expectativas da coletividade local quanto à sua adequação ao ambiente. Desta forma, a Comissão inicialmente elaborou e referendou as diretrizes do projeto, e depois de iniciados os estudos, fez o acompanhamento dos mesmos, deliberando sobre a sua consistência e, em alguns casos, redirecionando-os.

A metodologia utilizada na seleção preliminar de áreas prioritárias para a localização do aterro de resíduos industriais foi dividida em três etapas, descritas nas seções seguintes.

### **3.2 – Levantamentos preliminares**

Nesta etapa incluíram-se os levantamentos de dados básicos da região em estudo, tais como mapeamento regional nas escalas existentes, ou seja 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000. As folhas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1969) de Araras, Rio Claro, Piracicaba e Limeira na escala 1:50.000 foram utilizadas para a composição de um mapa base para o estudo na escala 1:100.000.

O levantamento de dados incluiu uma pesquisa junto à Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1996), e à Secretaria de Estado do Meio Ambiente (1994), referente aos estudos existentes sobre resíduos sólidos na região de interesse.

Foram consultadas as legislações estaduais, leis orgânicas municipais e também os planos diretores municipais.

### **3.3 – Levantamentos básicos do meio físico**

Nesta etapa efetuaram-se os levantamentos básicos do meio físico, ou seja os parâmetros mais relacionados com o empreendimento, para subsidiar a definição das áreas promissoras para a instalação do aterro. Esses levantamentos incluíram os seguintes temas:

- a) uso e ocupação do solo/ecossistemas sensíveis/infra-estruturas;
- b) restrições legais/áreas de interesse ambiental;
- c) solos;
- d) geologia/hidrogeologia;
- e) recursos minerais;
- f) recursos hídricos.

Para cada um desses temas foram coletados dados que permitissem, na sua maioria, uma apresentação gráfica na escala 1:100.000, pelo que se utilizou o "software" Autocad. Os mapas assim elaborados correspondem aos temas selecionados para a definição das áreas mais adequadas à implantação do empreendimento.

### **3.4 – Seleção preliminar das áreas prioritárias**

O cruzamento das informações para a seleção preliminar de áreas foi realizado com base numa metodologia desenvolvida pela empresa Jaakko Pöyry Engenharia Ltda. (1992) mediante a aplicação de um "software" de planejamento e uso do solo, o RIA – “Resource Information and Analysis”.

Esta metodologia foi desenvolvida a partir da subdivisão em blocos regulares da área em estudo, compatíveis com a dimensão e a especificação do estudo. Posteriormente, os diversos mapas elaborados foram utilizados para se definirem valores numéricos que indicassem as condições ambientais de cada componente. Foram atribuídos pesos diferenciados para os diversos componentes: por exemplo, foram definidos critérios para a pedologia, de tal maneira que um bloco com solo bastante argiloso fosse considerado tecnicamente superior para o empreendimento. Com efeito, esses materiais, sendo de baixa permeabilidade, são particularmente favoráveis, dado que dificultam

tam o movimento de possíveis percolados. Nesta fase, o "software" foi utilizado para aglutinar os dados de cada bloco e o peso dos componentes, definindo-se assim os blocos que continham as áreas mais promissoras.

O processo de seleção utilizando o programa RIA, tem por objetivo fazer análises ambientais específicas processando informações de um banco de dados. Este banco de dados é estruturado a partir de informações obtidas do inventário ambiental da área em estudo.

Quatro tipos de análises foram efetuados pelo RIA:

1. determinação de distância entre pontos críticos;
2. avaliação de impactos utilizando matrizes;
3. avaliação da atratividade ambiental para a localização do empreendimento;
4. montagem de tabelas de coincidência de eventos, por exemplo, usos atual e futuro do solo.

No caso em questão, a opção que se mostrou mais adequada para o empreendimento foi a *Atratividade Ambiental* para a localização do empreendimento.

Devido às restrições ambientais, parte da área de estudo foi excluída do processo de seleção. Na área restante, que totaliza 3.600 km<sup>2</sup>, localizam-se os principais municípios geradores de resíduos na região. Pelo fato de ter sido subdividida em quadrículas de 1 km<sup>2</sup>, obteve-se um total de 2.065 quadrículas. O tamanho destas quadrículas foi determinado considerando-se que o empreendimento ocuparia apenas uma fração da área de 1 km<sup>2</sup> e, portanto, o resultado deste processo indicaria possíveis macro-localizações. Por outro lado, a escala de 1:100.000 utilizada na caracterização dos temas, combinada com as limitações computacionais, não permitia a utilização de quadrículas de menor área.

As análises incorporadas no RIA necessitaram de acesso a um banco de dados digitalizados, contendo informações básicas sobre a área estudada. Essas informações foram obtidas na fase de caracterização ambiental da área em estudo. O banco de dados foi construído utilizando o método do *grid overlay*, que consiste em sobrepor uma malha quadriculada por cima do mapa a ser digitalizado e assinalar um código (em geral um número) para a informação contida em cada célula da malha. Esta informação referia-se aos subsídios de cada mapa, como por exemplo os tipos de solos, designadamente latossolo roxo, solos litólicos, etc. Cada um dos mapas originados, chamados *temáticos*, elaborados na fase de inventário, foi digitalizado e desta forma o conjunto das informações armazenado em uma estrutura matricial. Os dados armazenados desta maneira constituíram o banco de dados que subsidiou a análise para a atratividade do local do empreendimento. Esta foi avaliada a partir da atribuição de um índice para cada célula de cada atividade que se pretendia realizar, utilizando-se combinações específicas das informações contidas na célula. Este índice foi calculado da maneira apresentada a seguir.

Para cada subtema de uma variável ou tema utilizado na análise da atratividade, foi atribuído um valor (peso) entre 0 e 10. Quando o valor era 0 (zero), o subtema era considerado como classe menos atrativa, ou seja, mais impactante, enquanto que o valor 10 significava como classe mais atrativa, ou seja, menos impactante. A isso se chamou de atratividade relativa das classes de um subtema. Por exemplo, sendo o tema analisado o uso e a ocupação do solo, a classificação *mata nativa* recebeu o valor 3, enquanto que a classificação *pastagem* recebia o valor 10. Caso não se pretendesse incluir uma determinada classe na escala de valores, a ela era atribuído o valor -1. Além dessa classificação de atratividade relativa das classes de um subtema, era conferido a este uma importância relativa a todos os subtemas escolhidos. Por exemplo, um subtema ao qual se atribuisse a importância relativa de 2, seria duas vezes mais importante que outro ao qual fosse conferida a importância relativa igual a 1.

Finalmente, um módulo de mapeamento incorporado no programa facilitou a reprodução dos resultados da análise da atratividade em forma de tabelas e gráficos.

Para a utilização do programa RIA é necessário definir-se pesos matemáticos para cada tema em sua ordem de importância. Entretanto, avaliou-se que os temas, embora diferissem em importância, não deveriam ter pesos que variassem muito. Cada tema foi subdividido em subtemas, que também precisam ser avaliados para a utilização do programa RIA .

Os pesos para os respectivos temas, relacionados em ordem decrescente, são apresentados no Tabela 1.

**Tabela 1** – Temas, subtemas e pesos utilizados no programa RIA – Resources, Information and Analysis.

Tema ou variável	Peso	Subtema	Valores atribuídos
Uso e ocupação do solo	5	Cana de açúcar	10
		Culturas anuais	10
		Pastagem ou campo antrópico	10
		Café, citros, fruticultura	9
		Silvicultura	7
		Vegetação natural (mata, capoeira, campo, cerrado, várzea)	3
		Área urbana	0
		Área de expansão urbana	0
Geologia/Hidrogeologia	5	Formação Corumbataí	10
		Formação Irati	10
		Suites básicas	5
		Formação Pirambóia	5
		Formação Tatuí	5
		Formação Itararé	5
		Formação Aquidauana	4
		Formação Rio Claro	4
		Depósitos aluviais	0
Recursos hídricos	4	Não há rio	10
		Há rio	6
		Reservatório	6
		Áreas de mananciais	0
Tipos de solos	3	Latossolo roxo	10
		Latossolo vermelho escuro	9
		Latossolo vermelho amarelo	8
		Terra roxa estruturada	7
		Podzol vermelho amarelo	5
		Solos litólicos	3
		Areias quartzosas	2
		Solos hidromórficos	0
Recursos minerais	2	Sem solicitação de nenhum tipo	10
		Com solicitações de pesquisa	8
		Com solicitação de lavra	4
Infra-estrutura	2	Menos que 2 km	10
		Mais que 2 km	7

Após a preparação do banco de dados e a elaboração da matriz de ponderação dos temas e subtemas, foi possível executar-se o programa. Os resultados obtidos consistem em um mapeamento que indica as melhores áreas para a implantação do empreendimento.

Entre as 2.065 quadrículas, o programa indicou que existiam 7 com as melhores características possíveis de cada tema. Estas se situam em áreas de plantação de cana de açúcar, e apresentam as principais características seguintes:

- litologia correspondente ao Grupo Passa Dois, Formação Irati: folhelhos, siltitos e calcários dolomíticos, ocorrendo sob latossolos roxos (DAEE/ UNESP, 1982);



- b) não há a presença de rios;
- c) não há solicitações de exploração mineral;
- d) os locais estão a menos de 2 km da infra-estrutura rodoviária.

Devido a estes resultados, é possível verificar-se que os pesos dos temas não interferem no resultado final, na medida em que as quadrículas apresentam a máxima pontuação possível. As áreas estão distribuídas entre os municípios de Piracicaba (3), Cordeirópolis (2), Santa Gertrudes (1) e Iracemápolis (1). Entretanto, esta última não apresenta condições satisfatórias, pois se encontra na cabeceira de alguns corpos d'água que demandam para um reservatório, o qual está previsto como ponto de captação futura para o município de Iracemápolis. Restaram, portanto, 6 áreas mais adequadas, favoráveis para a localização do empreendimento.

Em seguida a esta fase, fez-se a verificação das condições das áreas escolhidas, pela Comissão de Resíduos e pela Jaakko Pöyry Engenharia Ltda. Este processo resultou na seleção da área de 100 ha indicada na Figura 1 como a mais apta para receber o empreendimento. Nesta área foi escolhida uma outra menor, de área igual a 20 ha, correspondente à micro-localização do conjunto correspondente à primeira fase da Central de Tratamento, ou seja, o aterro de resíduos industriais, as instalações administrativas, o laboratório e a área para a implantação do sistema de tratamento do percolado.

### 3.5 – Aspectos geológicos e geotécnicos

Na área de influência imediata, definida como uma faixa de 1 km ao redor da intervenção, ocorrem as seguintes litologias (DAEE/UNESP, 1982):

- Grupo Tubarão, Formação Tatuí (Carbonífero-Permiano): depósitos de origem marinha, apresentando siltitos e arenitos finos estratificados.
- Grupo Passa Dois, Formação Irati (Permiano): siltitos, argilitos e folhelhos, com ocasionais níveis de calcários intercalados.
- Suites intrusivas básicas (Triássico-Cretácico Inferior): corpos de diabásio em vários estágios de alteração, com intenso diaclasamento.

Quanto aos solos, a área de intervenção apresenta-se recoberta por latossolos roxos (Instituto Agrônomo de Campinas, 1984), formados a partir da alteração das suites intrusivas básicas. Os perfis apresentam acentuada homogeneidade vertical, sendo difícil a diferenciação dos horizontes e mesmo dos sub-horizontes. A cor predominante do horizonte B é bruno avermelhada, e a do horizonte A é ligeiramente mais escura. Sabe-se, da Pedologia, que o horizonte A é um horizonte escuro, com matéria mineral e orgânica e alta atividade biológica, e que o horizonte B é um horizonte de acumulação de argila, matéria orgânica e óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio.

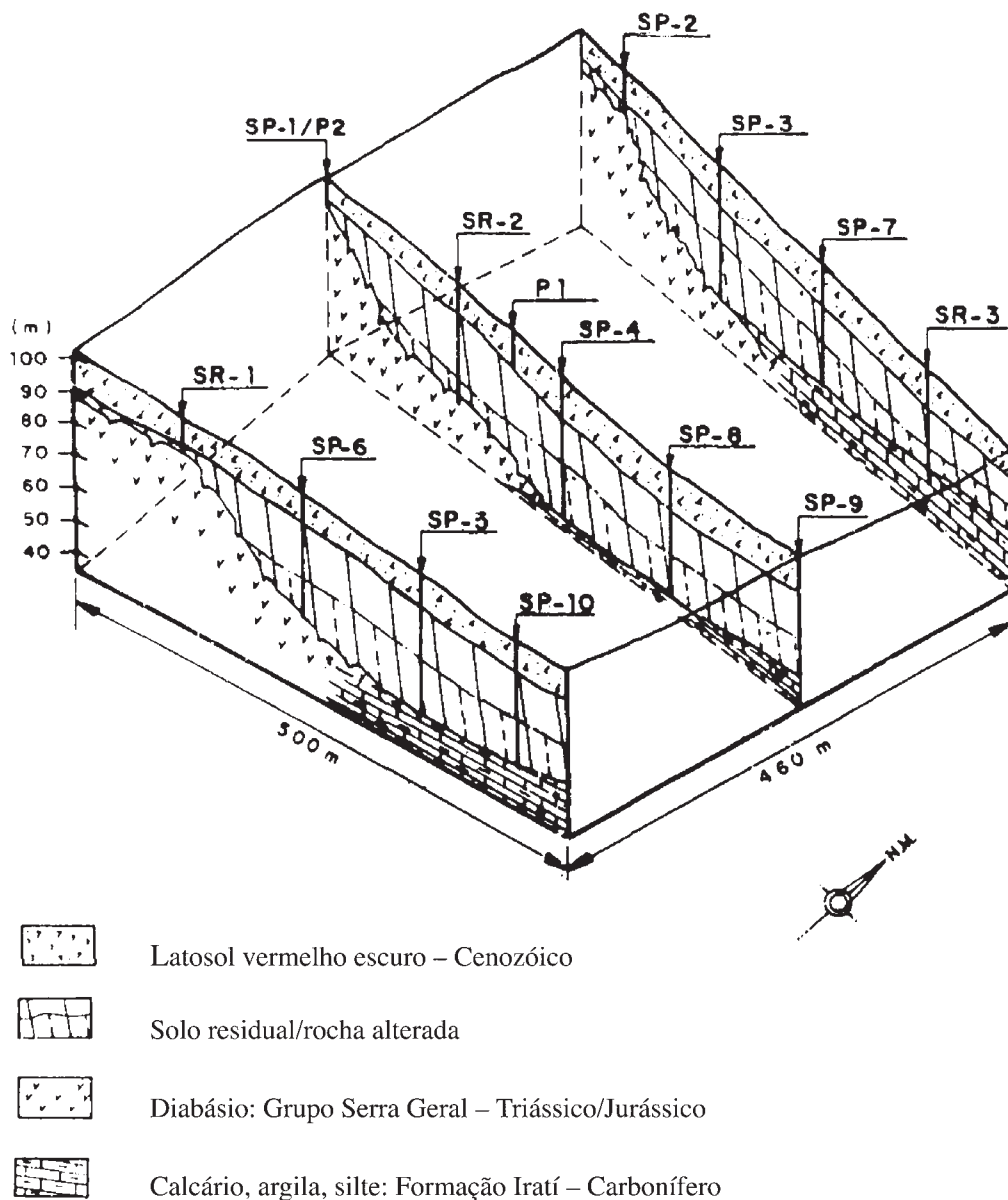
Foram realizados na área 423 m de sondagens mecânicas (percussão e rotativas) e 20,5 m de poços para a observação do solo e extração de amostras deformadas e indeformadas para ensaios de laboratório no âmbito da Mecânica dos Solos e da Mineralogia, o que permitiu a configuração de bloco-diagrama com as informações sobre a geologia local (Figura 2). A amostragem de todo o perfil foi executada até se atingir o nível d'água, a partir do qual foram realizados ensaios de permeabilidade "*in situ*".

O modelo geológico definido pode ser sintetizado através do seguinte perfil:

- a) camada de solo superficial: argila arenosa porosa, mole a média, marrom avermelhada (latossolo roxo), com espessuras variando de 6 a 12 m;
- b) solo de alteração de rocha: argila silto-arenosa marrom avermelhada, com manchas/veios amarelados e espessuras de 1 a 4 m;
- c) rocha alterada: silte argilo-arenoso, médio a rijo, variegado, com níveis argilo-arenosos intercalados, e fragmentos de rocha de cor acinzentada na base e espessuras variando de 20 a 30 m;



d) rocha sã: rocha básica (diabásio), muito fraturada e friável no contato, cor cinza-esverdeado a cinza amarelado, granulação fina a média e rocha sedimentar mostrando alternância de calcário com siltitos e argilitos, cor cinza claro e escuro.



**Fig. 2** – Bloco diagrama da área do projeto, com os cortes geológicos e as sondagens realizadas.

O contato entre o manto de intemperismo e a rocha sã, definido como topo rochoso, apresenta-se bem fragmentado e fraturado/cisalhado, como se observou nas sondagens rotativas realizadas.

O “degrau” no topo rochoso existente na borda oeste da área (mais alta) pode ter favorecido uma concentração do fluxo de água subterrânea em direção à parte mais baixa, ocasionando as maiores espessuras de alteração de rocha nesse local.

As amostras relativas aos horizontes a, b e c foram numeradas conforme se mostra na Tabela 2.

**Tabela 2** – Numeração e profundidade das amostras obtidas a partir das sondagens nos horizontes a, b e c.

Sondagens	SP-4	SP-5	SP-7	SP-4	SP-5	SP-7	SP-4	SP-5	SP-7
Horizontes	a			b			c		
Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Profundidade (m)	0 a 9	0 a 10	0 a 11	9 a 11	10 a 14	11 a 14	11 a 20	14 a 23	14 a 23

Para cada horizonte descrito, foi estudada a composição das amostras recolhidas metro a metro, para representar a camada de solo de interesse na análise granulométrica.

As granulometrias e os limites de Atterberg dos solos são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** – Granulometrias e limites de Atterberg dos solos dos horizontes a, b e c.

Horizontes		a				b		c		
Amostras		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Granulometria (%)	Argila	60	56	42	59	52	32	60	49	34
	Silte	13	18	30	14	24	41	14	30	36
	areia fina	25	24	27	25	22	24	25	20	28
	areia grossa	2	2	1	2	2	3	1	1	2
Limites de Atterberg (%)	LL	44,2	47,5	52,8	40,9	51,1	57,8	40,6	57,5	55,9
	LP	27,1	30,3	37,6	27,7	37,0	39,0	31,3	36,1	36,7
	IP	17,1	17,2	15,2	13,2	14,1	18,8	9,5	21,4	19,2

Os parâmetros adotados para o projeto das células foram taludes laterais com inclinação de 45°, sendo esses taludes e a base constituídos por solos locais misturados a solos importados com 1 m de espessura e compactados de maneira a garantir um coeficiente de permeabilidade de  $10^{-7}$  cm/s. As dimensões das células para resíduos Classe I são de 20 m de largura, 50 m de comprimento e 5 m de profundidade, enquanto que aquelas para resíduos Classe II terão 60 m de largura, 200 m de comprimento e 10 m de altura. A camada drenante será constituída por seixos rolados e pedregulhos arredondados e terá uma condutividade hidráulica de  $10^{-3}$  cm/s.

### 3.6 – Considerações sobre o movimento de compostos no subsolo

- O movimento de compostos orgânicos solúveis e metais pesados no solo é influenciado por:
- fatores ligados ao solo (pedológicos);
  - propriedades dos compostos disponíveis para a lixiviação;
  - fatores climáticos;
  - interferências antrópicas na área.

A estocástica do movimento de qualquer soluto no solo é determinada por fatores climáticos, mais precisamente pela precipitação ou pelas propriedades do solo isoladas ou em conjunto. É comum admitirem-se os parâmetros ligados ao solo como fixos e concentrar todas as incertezas na precipitação.

Vários níveis de análise podem ser realizados para determinar o risco de poluição de um lençol subterrâneo por uma substância ou composto lançado na superfície ou aterrado poucos metros abaixo da mesma. Devido ao grande potencial poluidor e à toxidez de alguns compostos, o projeto de um aterro de resíduos industriais exige estudos de lixiviação em colunas ou projetos pilotos, para serem avaliadas algumas das conseqüências da implantação. Na maioria das vezes utilizam-se modelos matemáticos que permitem avaliar o risco da implantação da obra, a partir de informações sobre o local e no reconhecimento dos compostos presentes entre os resíduos aterrados.

Muitos são os modelos disponíveis, cuja utilização está, na maioria das vezes, condicionada à disponibilidade de parâmetros específicos. Steenhuis e Naylor (1985) elaboraram um método simples para se avaliar o risco de um produto lançado ou aterrado no solo alcançar o lençol subterrâneo. Tais métodos devem ser desenvolvidos anteriormente ao projeto ou mesmo durante a sua elaboração. Caso sejam detectados problemas, as mudanças respectivas devem ser implementadas para resguardar os recursos a serem protegidos. Nesta mesma linha de pensamento, Mahmood e Sims (1986) desenvolveram um índice denominado Índice de Mobilidade e Degradação (MDI), que corresponde à relação entre o tempo de movimento de um composto no solo e a sua meia vida, ou seja, o tempo necessário para reduzir a sua massa, por degradação biológica, em 50%.

Abordagem semelhante tem sido utilizada pela US Environmental Protection Agency, em áreas com problemas potenciais relacionados à implantação de novos projetos de aterros de resíduos industriais e com questões envolvendo a poluição de outros recursos (Mills, 1985).

Neste projeto ora apresentado, há uma situação particular. A região tem déficit hídrico anual de 96 mm e a percolação profunda somente ocorre nos meses de fevereiro e março, observando-se índices totais de infiltração de somente 20 mm no ano. Considerando-se que o aterro teria a sua base inferior protegida por solo compactado com coeficiente de permeabilidade  $k = 10^{-7}$  cm/s, sobre o qual será colocada uma manta impermeável, a probabilidade de vazamentos e conseqüente lixiviação para o lençol subterrâneo, situado a uma profundidade mínima de 22,48 m a contar do fundo da vala, é bastante pequena. Visando fornecer informações sobre as possibilidades reais de uma pluma gerada no aterro industrial atingir o lençol subterrâneo, optou-se por realizar uma análise baseada no tempo gasto por alguns poluentes para percorrer a distância vertical citada. Considerou-se o tempo de um ano, o que representaria risco elevado e curto espaço de tempo.

A análise sugerida foi realizada utilizando-se a teoria do *deslocamento tipo pistão*, ou seja, o centro de massa de uma pluma de poluente desloca-se no solo de forma compacta como se fosse uma sucessão de fluxos de água contendo a porção solúvel do composto analisado. A localização do centro da massa de uma pluma pode ser determinada com relativa facilidade, porém a forma da mesma, determinada pela dispersão do poluente no solo, necessita de um equacionamento mais detalhado.

Optou-se por determinar somente a localização do centro de massa, caso esta corresponda aos 22,48 m, no período de um ano.

O movimento de um composto químico no solo é atenuado devido, entre outros fatores:

- à degradação biológica;
- à adsorção;
- à volatilização;
- à hidrólise;
- à precipitação;
- à absorção pela vegetação.

No presente modelo, adotou-se a adsorção linear e a degradação biológica de primeira ordem. Para avaliar a situação mais crítica, os cálculos efetuados consideraram a adsorção como único mecanismo atenuador.

Com base nos resultados obtidos, na proposta para as células de aterramento dos resíduos (Figura 3) e considerando a possibilidade dos sistemas de coleta de percolado e impermeabilização apresentarem defeitos, analisou-se a hipótese de alguns contaminantes virem a atingir o lençol freático local e, por conseqüência, o aquífero regional. Para esta análise considerou-se a ruptura da dupla isolamento em PVC da célula de resíduos perigosos e o deslocamento da pluma de contaminação através da camada de argila compactada na base da vala e do substrato até o nível do lençol freático (22,48 m).

A posição do centro de massa de uma pluma ( $u$ ) pode ser determinada pela seguinte equação (Mills, 1985):

$$u = \frac{q / w}{1 + b k_d / f} \quad (1)$$

onde:

$u$  = deslocamento do composto químico no tempo  $t$  (cm/ano)

$q$  = percolação anual (cm/ano)

$w$  = capacidade de armazenamento do solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$b$  = massa específica do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$k_d$  = Coeficiente de partição (refere-se à difusão do produto no solo,  $\text{cm}^3/\text{g}$ )

$f$  = umidade do solo durante o movimento ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

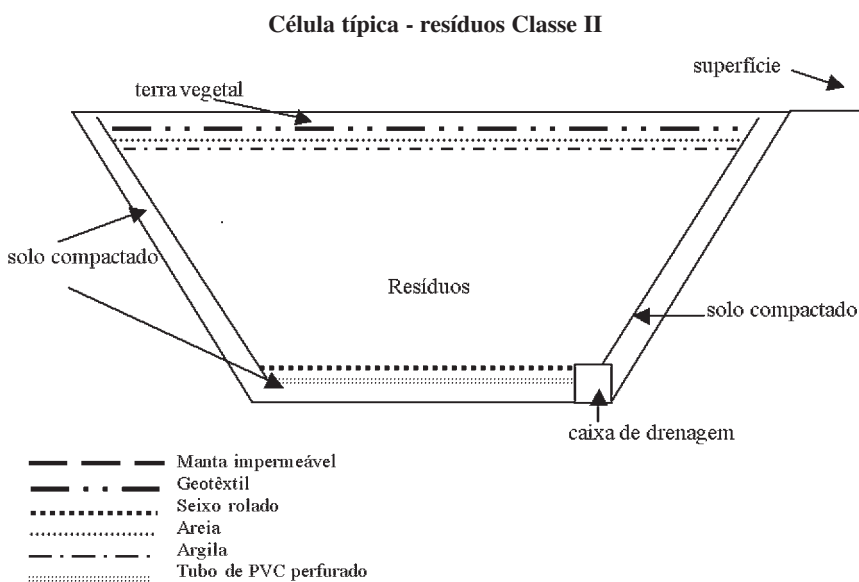
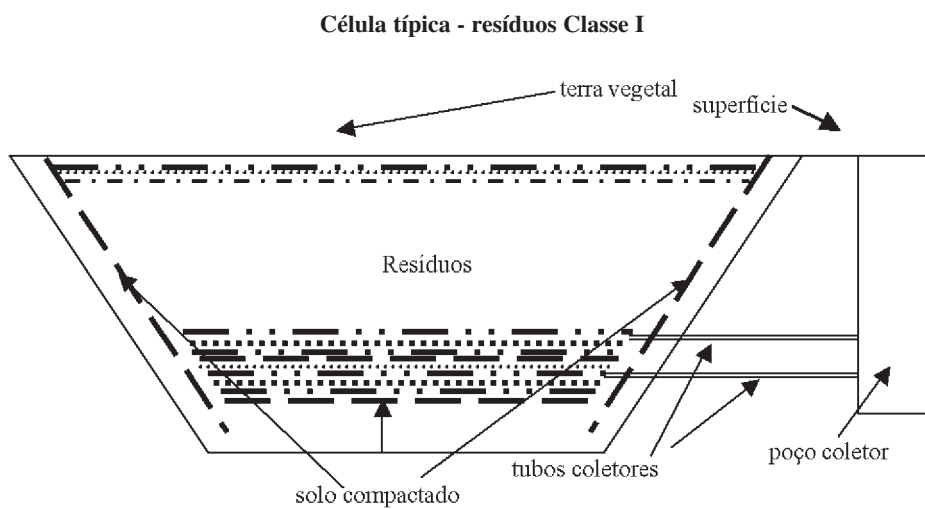
O tempo ( $t_1$ ) para que o centro da massa poluente atinja o lençol freático é calculado a partir da equação:

$$t_1 = \frac{100 \cdot h}{u} \quad (2)$$

onde:

$u$  = deslocamento do composto químico no tempo  $t$  (cm/ano)

$h$  = distância, na vertical, até o lençol freático (m)



Observações: desenhos esquemáticos, sem escala

Inclinação das escavações laterais das células: 45°

**Fig. 3** – Células projetadas para a estocagem de resíduos perigosos (Classe I) e não inertes (Classe II), Classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

O decaimento do produto analisado ao entrar em contato com a água subterrânea pode ser determinado pela equação:

$$C(t) = C(0) \exp(-k_s t_I) \tag{3}$$

onde:  
 $C(t)$  = concentração de produto químico entrando na água subterrânea  $t_I$  anos após o início da lixiviação (g/ha)  
 $C(0)$  = concentração inicial ( $t = 0$ ) (g/ha)  
 $k_s$  = coeficiente de decaimento (ano<sup>-1</sup>)  
 $t_I$  = tempo requerido para que o centro da massa poluente atinja o lençol freático (ano).

#### 4 – RESULTADOS

As análises granulométricas realizadas ao solo local mostraram que o mesmo é essencialmente argiloso, sendo que na maioria das análises o teor de argila foi superior a 40%. Para esse tipo de solo, as propriedades médias são as que se mostram na Tabela 4.

**Tabela 4** – Propriedades médias das argilas e misturas de argilas.

Parâmetro	Valor médio
Densidade (g/cm³)	1,30
Capacidade de campo (cm³/cm³)	0,36
Ponto de murchamento (cm³/cm³)	0,22

Fonte: Baes e Sharp (1983)

Os produtos químicos selecionados para a simulação foram: fenol, tricloroetileno, cobre, zinco, cádmio e chumbo.

Estudos sobre o movimento de metais pesados no solo têm-se concentrado nos lodos de estações de tratamento de esgotos e esgotos tratados. Dowdy e Volk (1983) apresentaram uma avaliação sobre o problema do movimento de metais pesados no solo com percentagens variadas de lodos, através de avaliações em experiências de laboratório e de campo. Nos locais de aplicação aos lodos das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), a umidade excessiva do lodo promove taxas de percolação elevadas. As condições avaliadas pelos autores citados são o oposto das encontradas no local deste estudo, que se caracteriza por uma deficiência de água para a lixiviação de compostos químicos.

A lixiviação dos metais pesados está diretamente relacionada com as propriedades do solo seguintes: pH, capacidade de troca de cátions, força iônica e presença de ligantes. A presença de matéria orgânica e óxidos hidratados interfere também na mobilidade dos metais pesados.

Na revisão de Dowdy e Volk (1983), destaca-se a baixa mobilidade de metais pesados no solo. A maior preocupação com relação a tais poluentes é a absorção pelas plantas. Para taxas acumuladas de aplicação de 1.257, 270 e 64 kg/ha de zinco, cobre e cádmio, respectivamente, as concentrações no percolado, a 86 cm de profundidade, aumentaram de 18 para 35 g/l para o zinco e de 5 para 10 g/l para o cobre e para o cádmio.

No presente trabalho, a avaliação da mobilidade de metais pesados foi feita utilizando-se o mesmo conceito descrito pelas equações 1, 2 e 3, ou seja, metais pesados dissolvidos no percolado migram em direção ao lençol de água subterrânea, sofrendo um retardamento que é sintetizado pelo coeficiente de adsorção (Baes e Sharp, 1983).

No caso em questão, não foi determinada a percentagem de matéria orgânica no solo, pois o mesmo não a possui. As simulações foram feitas para 0%, 0,1% e 0,5% de matéria orgânica, o que representa adsorção zero e bastante moderada.

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros relativos aos compostos analisados para as simulações, e na Tabela 6 os coeficientes de partição de fenol e tricloroetileno, nas condições expostas na tabela anterior.

**Tabela 5** – Parâmetros utilizados nas simulações.

Compostos	$t^{1/2}$ (dia)	$\log k_{ow}$	$k_d$ médio (cm <sup>3</sup> /g)
Fenol	4,0	1,46	–
Tricloroetileno	4,321	2,29	–
Cádmio	–	–	6,7
Chumbo	–	–	99,0
Cobre	–	–	55,0
Zinco	–	–	16,0

Fonte: Baes e Sharp (1983); Steenhuis e Naylor (1985)

Notas:  $t^{1/2}$  = meia vida de um produto;  $k_{ow}$  = partição de um produto químico em octanol – água (cm<sup>3</sup>/g);  $k_d$  = coeficiente de partição

A relação entre  $k_{ow}$  e  $k_d$ , utilizada pela USEPA (Mc Clean, 1988) é:

$$\log k_d = \log k_{ow} - 0,317$$

$$k_d = k_{oc} \cdot (\%OC)$$

$$\%OC = 0,59 \cdot (\%OM)$$

onde:

$k_{oc}$  = coeficiente de partição com carbono orgânico (cm<sup>3</sup>/g)

% OC = percentagem de carbono orgânico

% OM = percentagem de matéria orgânica

Os demais parâmetros utilizados nas simulações foram:

$u$  = percolação: 2 cm/ano

$w$  = capacidade de armazenamento de água no solo: 0,14 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$f$  = umidade do solo durante o movimento = capacidade de campo: 0,36 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$h$  = distância vertical mínima do lençol freático em relação à superfície: 22,48 m.

**Tabela 6** – Coeficientes de partição para o fenol e o tricloroetileno (TCE).

Composto	Matéria orgânica (%)	Coeficiente de partição ( $k_d$ )
Fenol	0	0
	0,1	0,80
	0,5	4,1
TCE-Tricloroetileno	0	0
	0,1	5,50
	0,5	27,7



Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos cálculos efetuados relativamente ao movimento no solo dos compostos tabelados e o tempo de seu percurso até o lençol de água subterrânea.

**Tabela 7** – Deslocamento dos compostos no solo e tempo necessário para atingirem o lençol freático.

	u = distância percorrida (cm/ano)				t <sub>f</sub> = tempo necessário para atingir o lençol freático (ano)			
	% matéria orgânica				% matéria orgânica			
	0	0,1	0,5		0	0,1	0,5	
Fenol	14,28	3,7	0,9	–	157,0	608,0	2498,0	–
TCE	14,28	0,7	0,14	–	157,0	3211,0	16057,0	–
*Cádmio	–	–	–	0,6	–	–	–	3747,0
*Chumbo	–	–	–	0,07	–	–	–	32114,0
*Cobre	–	–	0,04	–	–	–	–	56200,0
*Zinco	–	–	–	0,24	–	–	–	9367,0

\* Os metais pesados foram analisados considerando-se os coeficientes de partição citados na literatura, pois o retardamento destes não depende somente do teor em matéria orgânica.

### 5 – CONCLUSÕES

1. A utilização do RIA – Resources, Information and Analysis na escolha de áreas para a construção do aterro de resíduos industriais de Piracicaba mostrou-se um mecanismo eficiente, fornecendo um conjunto de informações que possibilitaram uma visão geral sobre a região e a importância de cada parâmetro analisado no contexto do projeto, durante a fase do EIA-RIMA – Estudos de Impacto Ambiental-Relatório de Impacto de Meio Ambiente.
2. O pleno conhecimento das características geológicas e geotécnicas da área escolhida, resultante dos trabalhos de prospecção e ensaios de laboratório, permite assegurar que quaisquer situações desfavoráveis que venham porventura a ser detectadas possam ser mantidas rigorosamente sob controle com um projeto de engenharia que considere todos os condicionantes existentes, e com a permanente fiscalização dos órgãos de controle ambiental e da sociedade organizada.
3. A avaliação preliminar realizada mostra que a percolação de metais pesados e compostos orgânicos não representa problemas no local do aterro industrial de Piracicaba. Sem retardamento, um composto solúvel como o fenol necessitaria de 157 anos para atingir o lençol freático no local. Este fato se deve ao tipo de solo da área (elevado teor de argila) e ao baixo valor da percolação local, 20 mm/ano. Cumpre registrar que este resultado representa uma situação onde se considerou que o solo teria um teor de matéria orgânica igual a zero e, portanto, desconsidera o mecanismo da adsorção. Entretanto, neste caso as condições existentes sugerem que isto não deve ser a situação real e, assim, o tempo necessário para a migração poderá ser ainda maior. Além disso, a análise anterior foi feita sem considerar a degradação do fenol e do TCE, portanto em condições bastante conservadoras.
4. O período de meia vida de um fenol é de 4 dias, o que quer dizer que, segundo o modelo exponencial, após 4 dias no solo a concentração deste produto estará reduzida a 50% da inicial. A aplicação deste modelo de decaimento exige o conhecimento da concentração inicial do poluente,

de difícil detecção neste estágio do trabalho. Porém, a análise feita permite dizer que, mesmo na ausência de impermeabilização, compostos como o fenol, o TCE e os metais pesados não alcançariam o lençol freático em concentrações detectáveis. O cádmio, o metal mais solúvel, somente alcançaria o lençol freático em 3.457 anos.

5. Em função dos resultados obtidos nas pesquisas de detalhe e nas simulações realizadas, considerando-se as possíveis contaminações decorrentes de falhas nos sistemas de impermeabilização das valas, a Comissão de Resíduos referendou o projeto para o EIA-RIMA – Estudos de Impacto Ambiental-Relatório de Impacto de Meio Ambiente – da área considerada.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baes, C. F.; Sharp, R. D. A proposal for estimation of soil leaching and leaching constants for use in assessment models. *Journal of Environmental Quality*, vol. 12, no.1, 1983.
- Campos, J. de O; José, C.; Otero, J. Typologie et stockage des déchets industriels dans la Région de Piracicaba, Brésil. *Congrès International Procédés de Solidification et de Stabilisation des Déchets*. J.M. Cases and F. Thomas Editors. Nancy, França. Actes, pg. 64-69, 1993.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. Consolidação do inventário de fontes (incluindo os municipais) e de locais de tratamento e disposição final de resíduos sólidos. São Paulo, 1996.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB. Resíduos Sólidos Industriais, 234 pg., 1993.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. Inventário de resíduos industriais: cadastro de 459 indústrias nas Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, São Paulo, 1993.
- Consórcio Intermunicipal das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba e Capivari. A gestão das águas e resíduos sólidos na França: relatório de viagem de estudos e informações. Americana (SP), 1997.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE; Universidade Estadual Paulista – UNESP. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, quadrículas de Campinas. Escala 1:250.000, 1982.
- Dowdy, R. H.; Volk, V. V. Movement of heavy metals in soils. In: *Chemical Mobility and Reactivity in Soils Systems*. Soil Science Society of America, Special Publication no 11, Madison, WI, 1983.
- Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo. Campinas, 1984.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Levantamentos básicos do Estado de São Paulo: folhas de Araras, Limeira, Piracicaba e Rio Claro, escala 1:50.000, Rio de Janeiro, 1969.
- Jaakko Pöyry Engenharia Ltda. Diagnóstico de Resíduos Sólidos Industriais. Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Industriais. Relatório do EIA-RIMA, 1992.
- Mahmood, R. J.; Sims, R.C. Mobility of organic in land treatment systems. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 112, no 2, 1986.
- Mc Clean, J. E. Evaluation of mobility of pesticides in soil using - EPA Methodology. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 114(3), 1988.
- Mills, W.B. Water Quality Assessment: a screening procedure for toxic and water, part. I. EPA/600/6-85/002a, 1985.
- Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA. Estabelecimento de metas ambientais e reenquadramentos de corpos d'água: Bacia do Rio Piracicaba, São Paulo, 1994.
- Steenhuis, T. S.; Naylor, L. M. Rapid appraisal of relative risk by soil applied chemical. *International Conference on New Frontiers for Hazardous Waste Management*, 1985.