

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE  
HUMANA PARA O GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS**

**Diego Cathcart**

**Orientador: Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil  
Coorientador: Eng. Dr. Marcio Roberto Schneider**

**2014/2**



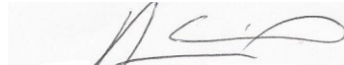
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO À  
SAÚDE HUMANA PARA O GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

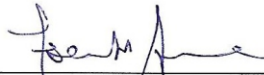
DIEGO CATHCART

Trabalho submetido à Banca Examinadora como  
parte dos requisitos para Conclusão do Curso de  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental  
– TCC II

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil  
(Orientador)



Prof. Dr. Fernando Soares Pinto Sant'Anna  
(Membro da Banca)



Engo. Marcos Felipe Wendt  
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)  
DEZEMBRO/2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Cathcart, Diego

Análise comparativa de modelos de avaliação de risco à saúde humana para o gerenciamento de áreas contaminadas / Diego Cathcart ; orientador, Henry Xavier Corseuil ; coorientador, Marcio Roberto Schneider. - Florianópolis, SC, 2014.  
155 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Avaliação de risco à saúde humana. 3. Modelos matemáticos. 4. Gerenciamento de áreas contaminadas. 5. Análise comparativa. I. Corseuil, Henry Xavier. II. Schneider, Marcio Roberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Este trabalho é dedicado aos  
grandes responsáveis pelas minhas  
conquistas, meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Henry Xavier Corseuil, por gentilmente aceitar orientar este trabalho e pelos ensinamentos ao longo dos meus anos de graduação.

Ao Doutor Marcio Roberto Schneider, coorientador e grande mentor deste trabalho. Agradeço imensamente pelos ensinamentos compartilhados, pela disponibilidade e especialmente pela confiança depositada em mim ao longo destes quase dois anos de W2S3.

Ao REMA em especial à Doutora Cristina Cardoso Nunes e à Karina Lopes Joussef pelo suporte e orientação durante meu período como bolsista do projeto SCBR - o início no “universo” do gerenciamento de áreas contaminadas.

Aos amigos da W2S3, membros atuais e antigos, que de uma maneira ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora pelas contribuições e pelo tempo despendido na correção deste trabalho.

Aos meus queridos amigos que fizeram parte da minha vida ao longo dos meus anos de formação e que continuarão sempre presentes.

À B., pelo companheirismo, incentivo e pela paciência, especialmente na etapa derradeira deste trabalho

E finalmente a minha família, em especial aos meus pais, Guigo e Graça, as pessoas mais importantes da minha vida. Agradeço pelo amor incondicional e por todo o suporte sem os quais eu não teria chegado a esta etapa.

*“O homem não é nada além  
daquilo que a educação faz dele.”*  
(Immanuel Kant, 1803)

## RESUMO

A avaliação de risco à saúde humana é uma etapa importante no processo de gerenciamento de áreas contaminadas, na qual são determinadas as chances de ocorrência de efeitos adversos à saúde, decorrentes da exposição às substâncias químicas perigosas. Os modelos matemáticos utilizados no processo de quantificação do risco possuem uma série singularidades, as quais poderão gerar diferentes resultados para um mesmo cenário de contaminação. Este estudo comparou os modelos matemáticos de avaliação de risco à saúde humana: RISC 4, RBCA *ToolKit*, Planilhas CETESB e SCBR. Os resultados demonstraram que existem diferenças conceituais e de implementação matemática significativas entre os modelos. Também foram verificadas diferenças de até duas ordens de grandeza entre os modelos, nos resultados do risco e concentrações máximas aceitáveis quantificados a partir do mesmo cenário de contaminação e modelo conceitual de exposição e na concentração de exposição, determinada a partir do mesmo cenário de exposição. As diferenças observadas estão relacionadas aos valores *default* dos parâmetros físico-químicos e toxicológicos dos contaminantes e aos parâmetros de exposição dos receptores. As diferenças verificadas nos resultados poderão acarretar em diferentes classificações para a área de interesse de acordo com a Resolução CONAMA nº420/2009 e conseqüentemente mudanças nos procedimentos aplicáveis ao *site*, dentro do processo de gerenciamento de áreas contaminadas. De modo a minimizar as diferenças verificadas e qualificar o estudo realizado, cabe ao analista de risco utilizar bancos de dados dos contaminantes atualizados, priorizar modelos matemáticos de quantificação do risco que comportem a heterogeneidade do meio subterrâneo e realizar estudos de campo que propiciem o estabelecimento dos parâmetros de exposição e do ambiente específicos do *site*.

**Palavras-chave:** Avaliação de risco à saúde humana, Modelos matemáticos, Gerenciamento de áreas contaminadas.

## ABSTRACT

The human health risk assessment is an important step on the process of site assessment in which are determinate the chances of occurrence adverse effects on human health resulting from exposure of individuals to hazards chemicals. The mathematical models used as decision-making tools in the process of quantifying risk have a series of singularities, which may generate different results for the same contamination scenario. This study compared the risk assessment mathematical models: RISC 4, RBCA Toolkit, Planilhas CETESB and SCBR. The results demonstrated there are significant conceptual and mathematical differences between the models. There are also differences between the models in the risk and site specific target levels, quantified from the same scenario of contamination and conceptual model, and in the exposure concentration, quantified from the and exposure model. The observed differences in the results are primarily related to differences in default values of chemical and toxicological properties and the exposure parameters of receptors models. These differences may result in different site classifications, according to CONAMA Resolution 420/2009, modifying the procedures for environmental site assessment applicable to the site. To minimize these differences and qualify the study it is essential for the risk analyst to use: updated toxicological and chemical data, mathematical models that consider the heterogeneity of the porous media and field investigations that provide the establishment of site-specific values of exposure parameters instead of default values, usually utilized in human health risk assessment projects.

**Keywords:** Human health risk assessment, mathematical models, Site assessment.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Componentes básicos para caracterização do risco .....	6
Figura 3.1. Modelo conceitual de exposição simplificado .....	43
Figura 4.1. Representação esquemática das vias de exposição consideradas no modelo conceitual de exposição. ....	57
Figura 4.2. Risco carcinogênico total ao Benzeno no Cenário A.....	70
Figura 4.3. Índice de perigo total para o Chumbo no Cenário A. ....	74
Figura 4.4. Mapa potenciométrico simulado no SCBR.....	94
Figura 4.5. Mapa de condutividade hidráulica simulado no SCBR .....	95
Figura 4.6. Evolução da pluma de Benzeno em fase dissolvida no fluxo subterrâneo. ....	96
Figura 4.7. Variação da concentração de Benzeno no ponto de exposição para 10 anos de simulação no SCBR.....	99
Figura 4.8. Variação da concentração de Benzeno no ponto de exposição para 10 anos de simulação no RISC 4.....	99
Figura 4.9. Variação da concentração de Benzeno no ponto de exposição para 50 anos de simulação no RISC 4.....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Meios contaminados e vias de exposição do RISC 4. ....	25
Tabela 3.2. Modelos de transporte e transformação de contaminantes disponíveis ao usuário no RISC 4. ....	26
Tabela 3.3. Parâmetros de exposição dos receptores do RISC 4. ....	28
Tabela 3.4. Vias de exposição do modelo RBCA <i>ToolKit</i> . ....	31
Tabela 3.5. Parâmetros de exposição dos receptores do modelo RBCA <i>ToolKit</i> . ....	34
Tabela 3.6. Vias de exposição das Planilhas CETESB. ....	36
Tabela 3.7. Parâmetros de exposição dos receptores disponíveis ao usuário pelas Planilhas CETESB. ....	38
Tabela 4.1. Compilação dos parâmetros de exposição <i>default</i> dos modelos avaliados. ....	48
Tabela 4.2. Compilação das vias de exposição disponíveis nos modelos avaliados. ....	51
Tabela 4.3. Concentrações estabelecidas para os compostos químicos de interesse. ....	54
Tabela 4.4. Valores <i>default</i> dos parâmetros toxicológicos dos bancos de dados dos modelos. ....	61
Tabela 4.5. Valores <i>default</i> dos parâmetros físico-químicos do Benzeno nos bancos de dados dos modelos. ....	62
Tabela 4.6. Valores default dos parâmetros físico-químicos do Chumbo no bancos de dados dos modelos. ....	63
Tabela 4.7. Dados de entrada do ambiente inferidos para o Cenário A. ....	64
Tabela 4.8. Risco carcinogênico ao Benzeno para o Cenário A. ....	67
Tabela 4.9. Índice de perigo total e por via de exposição ao Chumbo para o Cenário A. ....	73
Tabela 4.10. Concentrações máximas aceitáveis resultantes, por compartimento ambiental, para o Benzeno no Cenário A. ....	77

Tabela 4.11. Concentrações máximas aceitáveis resultantes, por compartimento ambiental, para o Chumbo no Cenário A. ....	79
Tabela 4.12. Parâmetros toxicológicos dos CQI no Cenário B. ....	81
Tabela 4.13. Parâmetros físico-químicos dos CQI no Cenário B. ....	82
Tabela 4.14. Parâmetros de exposição dos receptores no Cenário B. ...	83
Tabela 4.15. Comparação dos resultados do Risco carcinogênico ao Benzeno para os Cenários A e B. ....	86
Tabela 4.16. Comparação dos resultados do Índice de perigo ao Chumbo para os Cenários A e B. ....	87
Tabela 4.17. Comparação dos resultados das concentrações máximas aceitáveis ao Benzeno para os Cenários A e B. ....	89
Tabela 4.18. Comparação dos resultados das concentrações máximas aceitáveis ao Chumbo para os Cenários A e B. ....	89
Tabela 4.19. Dados de entrada nos modelos para a quantificação da concentração de exposição. ....	91
Tabela 4.20. Cargas hidráulicas e condutividades hidráulicas estabelecidas para os pontos de análise no modelo SCBR. ....	91

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AI	Área Contaminada sob Investigação
ARSH	Avaliação de Risco à Saúde Humana
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS <sub>D</sub>	Fator de Absorção Dérmica
ABS <sub>GI</sub>	Fator de Absorção Gastrointestinal
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, o-Xileno, m-Xileno, p-Xileno
COC	<i>Chemicals of Concern</i>
CMA	Concentrações Máximas Aceitáveis
CQI	Composto ou Substância Química de Interesse
EMR	Exposição Máxima Razoável
HQ	<i>Hazard Quotient</i>
LF	<i>Lixiviation Factor</i>
PA	Ponto de Análise
RAGS	<i>Risk Assessment Guidance for Superfund</i>
RBCA	<i>Risk-based Corrective Action tool Kit</i>
RBSL	<i>Risk-based Screening Level</i>
RfD	<i>Referencial Dose</i>
RISC	<i>Risk-integrated Software for Clean-ups</i>
RME	<i>Reasonable Maximum Exposure</i>
RSL	<i>Regional Screening Level</i>
SCBR	Solução Corretiva Baseada no Risco
SF	<i>Slope Factor</i>
SSTL	<i>Site Specific Target Levels</i>
TPH	Hidrocarbonetos Totais de Petróleo
UFSC	Universidade Federal De Santa Catarina
USEPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
VMP	Valores Máximos Permitidos
VF	<i>Volatilization Factor</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS .....	4
2.2 AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA .....	6
2.2.1 Coleta e avaliação de dados.....	7
2.2.2 Avaliação da toxicidade .....	7
2.2.3 Avaliação da exposição .....	7
2.2.4 Quantificação do risco.....	10
2.2.5 Quantificação das concentrações máximas aceitáveis...	12
2.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA.....	14
2.3.1 Processos de transporte e transformação de contaminantes nos modelos de avaliação de risco .....	14
2.3.2 Estudos comparativos entre modelos de avaliação de risco à saúde humana .....	19
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
3.1 METODOLOGIA <i>RISK BASED CORRECTIVE ACTION</i> ....	21
3.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS EMPREGADOS.....	22
3.2.1 RISC 4.0.....	23
3.2.2 <i>RBCA ToolKit for Chemical Releases</i> .....	30
3.2.3 Planilhas de Avaliação de Risco da CETESB .....	35
3.2.4 SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco.....	40
3.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS .....	41
3.4 AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE EXPOSIÇÃO..	42
3.4.1 Cenário de exposição.....	42
3.4.2 Modelos de transporte e transformação de contaminantes utilizados. ....	44
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS EM RELAÇÃO AOS RECEPTORES E VIAS DE EXPOSIÇÃO .....	46
4.1.1 Receptores .....	46

4.1.2	Parâmetros de exposição dos receptores .....	46
4.1.3	Vias de exposição.....	49
4.2	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	52
4.2.1	Modelo conceitual de contaminação .....	52
4.2.2	Modelo conceitual de exposição .....	54
4.2.3	Quantificação da exposição no Cenário A .....	60
4.2.4	Resultados das simulações do Cenário A.....	64
4.2.5	Quantificação da exposição no Cenário B .....	80
4.2.6	Análise comparativa Cenário A vs. Cenário B.....	84
4.3	AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE EXPOSIÇÃO..	90
4.3.1	Simulação do transporte e transformação da pluma de Benzeno no fluxo subterrâneo.....	90
4.3.2	Avaliação da concentração de exposição ao longo do tempo de simulação.....	97
4.4	INCERTEZAS DO ESTUDO .....	100
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>102</b>
<b>6.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>105</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>106</b>
	<b>APÊNDICE: PLANILHAS COM OS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS COMPARATIVOS. ....</b>	<b>112</b>
	Cenário A.....	113
	Cenário B .....	134
	<b>ANEXO</b>	

# 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O advento da industrialização levou ao crescimento da produção, manejo e disposição de compostos e substâncias químicas no meio ambiente, caracterizando danos ou risco de danos aos compartimentos ambientais água, solo e ar e conseqüentemente a conotação de áreas contaminadas (SHARMA e REDDY, 2004). Dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB dão conta de um total de 4.346 áreas contaminadas e 425 já reabilitadas para uso, até Dezembro de 2013 no estado de São Paulo. Deste total, os postos de combustíveis representam a maior parcela com 3.597 registros (75%), seguidos da indústria com 768 registros (16%) e comércio 232 registros (5%). (CETESB, 2014a)

O aumento da consciência ambiental da sociedade, a preocupação com aspectos relacionados à saúde humana e as exigências cada vez maiores dos órgãos ambientais motivaram a busca de soluções e ferramentas para o gerenciamento e subsequente recuperação destas áreas contaminadas. No Brasil, o conceito começou a ser mais discutido e divulgado a partir da elaboração, pela CETESB em parceria técnica com o Governo da Alemanha, do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001). A consolidação se deu com a publicação da Resolução CONAMA nº 420/2009 (CONAMA, 2009) que fornece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias químicas de interesse em decorrência de atividades antrópicas.

O gerenciamento de áreas contaminadas visa eliminar o perigo ou minimizar os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente, em virtude da existência das mesmas (CETESB, 2001; CONAMA, 2009;). Conforme estabelecido pela resolução CONAMA 420/2009, uma série de etapas sequencias integram o gerenciamento de áreas contaminadas:

- I. Identificação de áreas suspeitas de contaminação com base em avaliação preliminar e para aquelas em houver indícios de contaminação deve ser realizada uma investigação confirmatória;
- II. Diagnóstico a partir de uma investigação detalhada e avaliação de risco e,
- III. Intervenção a partir da execução de ações de controle que visem à eliminação do perigo ou redução do risco a níveis toleráveis e o

monitoramento da eficácia das ações de intervenção estabelecidas.

Segundo a norma brasileira - NBR 16209 (2013) a avaliação de risco é a etapa do processo de gerenciamento de áreas contaminadas na qual se determinam as chances de ocorrência de efeitos adversos à saúde, decorrentes da exposição humana a áreas contaminadas por substâncias perigosas. A avaliação de risco à saúde humana - ARSH é fundamental, permitindo o estabelecimento de concentrações máximas aceitáveis dos compostos químicos de interesse e ações corretivas baseadas no risco, para a área objeto de estudo e que levem em consideração as características específicas dela (ASTM, 2010). Desta forma, a ARSH possibilita a alocação de recursos financeiros para remediação da área ou mitigação do risco de maneira ambientalmente mais adequada e eficiente (PEDROZO *et al.*, 2002).

Dentro da conjuntura de avaliação de risco, os modelos matemáticos para o cálculo do transporte e transformações de contaminantes, quantificação do risco e estabelecimento de concentrações máximas aceitáveis, são amplamente utilizados como ferramentas de auxílio na tomada de decisão frente às áreas contaminadas (PINEDO *et al.*, 2014).

Os *softwares* mais aceitos pelos órgãos ambientais brasileiros e invariavelmente mais utilizados em projetos de avaliação de risco à saúde humana (GUIMARÃES, 2003; COUTO; 2006; JOUSSEF, 2013) são: RISC 4.0 (SPENCE e WALDEN, 2001), RBCA *ToolKit* (CONNOR *et al.*, 2007) e Planilhas de Avaliação de Risco da CETESB (CETESB, 2014b). O modelo matemático SCBR – Solução Corretiva Baseada no RISCO (CORSEUIL *et al.*, 2006) se estabelece como uma nova ferramenta na avaliação de risco à saúde humana, possibilitando ao usuário a implementação e quantificação do risco a partir de diferentes metodologias de ARSH. Além disso, considera a influência do etanol na simulação da concentração de exposição para os casos de receptores expostos aos derramamentos de gasolina que é comercializada no Brasil.

Os softwares de ARSH possuem uma série de singularidades em função da: metodologia de avaliação de risco adotada, formulações matemáticas de transporte e transformação de contaminantes, fontes da base de dados dos contaminantes, vias de exposição e receptores. Esta variabilidade de conceitos implementados, possibilita diferentes resultados do risco quantificado (para o mesmo cenário de contaminação) em função do *software* de avaliação de risco utilizado, podendo levar ao estabelecimento de concentrações máximas aceitáveis e ações corretivas na área contaminada excessivamente conservadoras



ou imprudentes. Sob o mesmo aspecto, alguns estudos foram realizados (CHANG *et al.*, 2004; CHEN e MA, 2006; PINEDO *et al.*, 2014), comparando modelos de avaliação de risco à saúde humana em diferentes cenários de contaminação.

Este trabalho tem como finalidade promover uma discussão acerca dos *softwares* de ARSH comumente utilizados em projetos de gerenciamento de áreas contaminadas no cenário nacional, auxiliando o analista de risco na escolha do software mais adequado em função do seu cenário de estudo. A importância e a motivação deste trabalho são dadas em função da ausência de estudos comparativos entre *softwares* de avaliação de risco internacionais e as Planilhas de Avaliação de Risco da CETESB, de caráter nacional.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi comparar os modelos matemáticos de avaliação de risco utilizados no Brasil, identificar diferenças nos resultados de simulação, suas principais causas e consequências, no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas.

Os objetivos específicos foram:

- Investigar e identificar as diferenças conceituais e de implementação matemática dos modelos de avaliação de risco à saúde humana usualmente empregados no gerenciamento de áreas contaminadas;
- Comparar os resultados do risco e das concentrações máximas aceitáveis quantificados pelos modelos avaliados a partir de cenários comparativos;
- Verificar as diferenças entre modelos unidimensionais e bidimensionais na determinação da concentração de exposição a partir da simulação de uma pluma de contaminante no fluxo subterrâneo;
- Avaliar o impacto da diferença nos resultados apresentados pelos modelos no estabelecimento de ações de gerenciamento em áreas contaminadas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

A conscientização do mundo industrializado com os problemas causados pelas áreas contaminadas teve início no final da década de 70 e início da década de 80, segundo a CETESB (2001). A ocorrência de eventos de contaminação de grande visibilidade e apelo popular como, "*Love Canal*" nos Estados Unidos, "*Lekkerkerk*" na Holanda e "*Villela Salle*" no Canadá foram fundamentais para a criação de políticas e legislações pertinentes. No Brasil, o conceito começou a ter destaque mais recentemente, com a elaboração, pela CETESB em parceria técnica com o Governo da Alemanha, do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001).

Segundo a definição dada por CETESB (2001) para área contaminada, sendo a área ou terreno onde há comprovadamente contaminação, confirmada por análises, que pode determinar danos e/ou riscos aos bens a proteger localizados na própria área ou em seus arredores. Os bens a proteger, de acordo com a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, Lei nº 6.938, 1981), são a saúde e o bem-estar da população; a fauna e a flora; a qualidade do solo, das águas e do ar; os interesses de proteção à natureza/paisagem; a ordenação territorial e planejamento regional e urbano; e a segurança e ordem pública. Dados divulgados pela CETESB (2014) a partir da "Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo" dão conta de um total de 4.771 áreas contaminadas no estado de São Paulo até dezembro de 2013, das quais, somente 425 estão reabilitadas para uso.

Em virtude de toda a problemática de danos ambientais e a saúde humana inerentes a uma área contaminada, ações que visem a sua recuperação são esperadas, e o conceito de gerenciamento de áreas contaminadas vem com este intuito. O gerenciamento de áreas contaminadas visa minimizar os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente, por meio de um conjunto de medidas que assegurem o conhecimento das características das áreas e dos impactos por elas causados, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequada (CETESB, 2001).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, a partir da resolução 420/2009, estabeleceu, em território nacional, os procedimentos e diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas

contaminadas, os quais deverão ser instituídos pelo órgão ambiental competente. Os procedimentos e ações estabelecidos por lei, para o gerenciamento de áreas contaminadas, são divididos em uma série de etapas sequenciais:

- I. Identificação de áreas suspeitas de contaminação com base em avaliação preliminar, e, para aquelas em que houver indícios de contaminação, deve ser realizada uma investigação confirmatória;
- II. Diagnóstico da área a partir da investigação detalhada e avaliação de risco, com objetivo de subsidiar a etapa de intervenção, após a investigação confirmatória que tenha identificado substâncias químicas em concentrações acima do valor de investigação; e
- III. Intervenção a partir execução de ações de controle para a eliminação do perigo ou redução, dos riscos identificados na etapa posterior, bem como o monitoramento da eficácia das ações executadas (CONAMA, 2009).

Diversas referências nacionais e internacionais estabelecem valores orientadores para substâncias e compostos químicos em solo e água subterrânea. No Brasil são utilizados:

- Valores Máximos Permitidos (VMP), em função do uso preponderante da água, da Resolução CONAMA n° 396 (2008);
- Valores de Investigação, preconizados na Resolução CONAMA n°420/2009.

O valor de investigação/intervenção é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado (CONAMA, 2009).

Na ausência de valores nacionais para os compostos e substâncias químicas de interesse, são utilizadas legislações de caráter internacional, a saber:

- *Regional Screening Levels* (RSL) da USEPA (2014); e
- Valores de Intervenção (*Intervention values*) da “Lista Holandesa” – *Soil Remediation Circular* (VROM, 2009).

## 2.2 AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA

A avaliação de risco ambiental representa uma das etapas mais importantes no gerenciamento ambiental de áreas contaminadas permitindo a definição de ações corretivas baseados no risco. O processo de gerenciamento ambiental baseado no risco é fundamentado na avaliação do risco potencial que compostos químicos de interesse, presentes numa determinada área impactada, possam causar à saúde humana e ao meio ambiente (PEDROZO *et al.*, 2002).

Entende-se como composto ou substância química de interesse – CQI, o composto detectado no meio físico, que está relacionada à fonte de contaminação. Deve possuir perfil toxicológico e físico-químico suficientes para ser utilizado na quantificação do risco toxicológico e no estabelecimento de metas de remediação (USEPA, 1989).

O conceito fundamental da avaliação de risco baseia-se na presença simultânea de um determinado contaminante e/ou fonte de contaminação, de vetores ou rotas de exposição e de receptores. Sem um destes componentes, não há caracterização de risco (PEDROZO *et al.*, 2002; GUIMARÃES, 2003).

Figura 2.1. Componentes básicos para caracterização do risco



Fonte (PEDROZO *et al.*, 2002)

O estabelecimento e surgimento de diversas metodologias de avaliação de risco à saúde humana, teve início, com a elaboração, em 1989, pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) do RAGS - Volume 1 (*Risk Assessment Guidance for Superfund - Volume 1 - Human Health Evaluation Manual - Part A*) (JOUSSEF, 2013). Dentre as metodologias de ARSH baseadas no RAGS, destaca-se, mais recentemente a elaboração da NBR 16.209 (ABNT, 2013), na qual são estabelecidos os procedimentos de avaliação de risco à saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas em decorrência da exposição a substâncias químicas.

O RAGS (USEPA, 1989) estabelece uma série de procedimentos a serem realizados para a quantificação do risco, os quais, também estão dispostos nas metodologias subsequentes. A coleta e avaliação de dados, avaliação da toxicidade, avaliação da exposição, caracterização e

quantificação dos riscos e gerenciamentos do risco são as etapas estabelecidas.

### **2.2.1 Coleta e avaliação de dados**

A coleta e a avaliação de dados ocorrem durante as próprias etapas do gerenciamento ambiental de áreas impactadas, se iniciando na avaliação preliminar e se estendendo na investigação confirmatória e na investigação detalhada (USEPA, 1989). Deve propiciar a aquisição das informações relevantes sobre a área, para a execução da etapa de avaliação de risco. A identificação dos contaminantes presentes, sua distribuição espacial, concentrações e dinâmica no meio físico, dão início à elaboração do modelo conceitual de exposição da área, o qual será essencial no processo de avaliação de risco.

Segundo USEPA (1989) o modelo conceitual de exposição constitui-se numa síntese das informações relativas a uma área em estudo, onde se pode visualizar, através de texto explicativo ou ilustração, a localização da contaminação, a sua forma de propagação e a sua relação com os bens a proteger existentes.

### **2.2.2 Avaliação da toxicidade**

A avaliação de toxicidade define a toxicidade específica para cada composto químico de interesse, considerando se os efeitos adversos à saúde associados à exposição ao composto. Para tanto, é necessário avaliar a relação entre a magnitude da exposição, o tipo de efeito adverso e a possibilidade de um composto produzir câncer no indivíduo ao longo da exposição.

Esta etapa pode ser dividida na identificação dos efeitos adversos - determinação do tipo e magnitude do efeito adverso à saúde que é causado pela exposição a um agente tóxico específico; avaliação quantitativa da toxicidade, relacionando-se a dose do contaminante que foi recebida com a incidência de efeitos adversos à saúde em uma dada população exposta - dose resposta (USEPA, 1989; CETESB, 2001).

### **2.2.3 Avaliação da exposição**

A avaliação da exposição tem como objetivo principal estimar o tipo e a magnitude da exposição à compostos e substâncias químicas de interesse no meio físico. A magnitude da exposição é estimada a partir

da quantificação do tempo de contato de um contaminante com a pele, pulmões e gastrointestinal (USEPA, 1989). Esta etapa é subdividida em três etapas sequenciais: a) Caracterização da exposição, com a determinação dos parâmetros do meio físico e os potenciais receptores expostos; b) Identificação dos caminhos de exposição com as fontes e mecanismos de contaminação e os pontos e rotas de exposição; e c) quantificação da exposição a partir das estimativas das doses de ingresso (CETESB, 2001).

#### 2.2.3.1 Caracterização da exposição

A caracterização da exposição consiste na análise de dados sobre o meio físico e das populações potencialmente expostas dentro e no entorno do *site* contaminado.

As características básicas sobre o meio físico a serem avaliadas, segundo CETESB (2001), são: presença, características e utilização: de cursos d'água superficiais, do sistema aquífero regional, de poços de captação para abastecimento de água em domínio público e particular; identificação, descrição e caracterização dos tipos de solo e tipos litológicos predominantes associados à geologia da região; descrição e análise das condições climáticas e sua variação segundo o ciclo hidrológico; e; direções predominantes de ventos.

As populações potencialmente expostas ou receptores, são, segundo os dispostos na NBR 16209 (ABNT, 2013), organismos, comunidades, habitats ou ecossistemas que estejam expostos direta ou indiretamente a um ou mais compostos químicos associados a um evento de contaminação ambiental. Para sua caracterização, os seguintes aspectos devem ser levados em consideração: uso e ocupação do solo; posição em relação às fontes e plumas de contaminação; densidade e frequência de ocupação do solo; presença de subpopulações sensíveis, tais como creches, hospitais, escolas, etc. (USEPA, 1989).

O resultado da caracterização de exposição é qualitativo, através da elaboração de um grupo de dados, os parâmetros de exposição, que serão posteriormente quantificados na etapa três de quantificação da exposição (USEPA, 1989).

#### 2.2.3.2 Identificação das vias de exposição

Nesta etapa são definidos todos os caminhos (rotas, vias) pelos quais os receptores identificados no item anterior podem ser expostos.

Um caminho de exposição deve descrever o curso de um composto ou substância química partindo da fonte até chegar ao ponto de exposição para uma determinada via de ingresso. Os caminhos de exposição são identificados com base em considerações sobre os seguintes itens: fontes e mecanismos de contaminação; meio onde está retida e/ou é transportada a contaminação; tipo e localização dos compostos químicos de interesse na área de estudo; processos de transporte e transformação dos compostos químicos de interesse no meio; pontos de exposição; vias de exposição (USEPA, 1989).

A fonte de contaminação representa o ponto de origem do derramamento. Geralmente, é o local onde são encontradas as mais altas concentrações dos contaminantes (PEDROZO *et al.*, 2002). A identificação de fontes e mecanismos de contaminação deve ser realizada a partir da compilação e revisão de informações sobre o processo operacional e produtivo da área contaminada (CETESB, 2001).

A via de ingresso é a maneira pela qual as substâncias e os compostos químicos de interesse entram em contato com a população exposta. De maneira geral, as vias de exposição que são consideradas em estudos de ARSH são: inalação, ingestão e contato dérmico (USEPA, 1989; CETESB, 2001; ABNT, 2013;).

O resultado da integração é a definição dos caminhos de exposição que podem ocorrer em uma área de estudo (USEPA, 1989). Um caminho de exposição é considerado completo quando são identificados os aspectos elencados anteriormente: fonte ou mecanismo de contaminação; ponto de exposição; Meio físico potencialmente contaminado pelo qual o contaminante pode ser transportado; e via de ingresso.

### 2.2.3.3 Quantificação da exposição

A quantificação da exposição consiste em quantificar a magnitude, a frequência e a duração da exposição, para cada caminho de exposição identificado na etapa anterior. A quantificação da exposição pode ser dividida em dois estágios: estimativa das concentrações de exposição e cálculo do ingresso.

A estimativa das concentrações de exposição corresponde a quantificação das concentrações dos compostos e substâncias químicas de interesse que estarão em contato com o receptor durante o período de exposição. As concentrações de exposição podem ser obtidas basicamente de duas formas:

- I. Através de amostragem dos compartimentos ambientais e análise laboratorial das amostras, estimando a concentração dos contaminantes no ponto específico de exposição onde foi coletada a amostra; e
- II. A partir de modelos matemáticos de transporte de contaminantes, extrapolando as concentrações em pontos de exposição onde não existem dados monitorados, obtidos conforme descrito anteriormente (USEPA, 1989).

O cálculo do ingresso corresponde a quantificação das concentrações dos compostos químicos de interesse que potencialmente ingressaram no organismo exposto por uma determinada via de ingresso, considerando cada caminho de exposição identificado (CETESB, 2001). O cálculo da dose de ingresso é baseado no critério conservador da Exposição Máxima Razoável (EMR), que é a máxima exposição razoavelmente esperada de ocorrer em um local para cenários de uso atual e futuro considerando um ou vários caminhos de exposição. Para tal, são utilizados valores máximos para as variáveis que descrevem a população exposta e período de exposição, e valor médio para a concentração do local (USEPA, 1989; ASTM, 2010). As Equações 1 e 2 apresentam a o cálculo do ingresso de um composto químico para uma via de exposição genérica.

$$I = C \times FE \quad (1)$$

$$FE = \frac{IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

Onde I é a dose de ingresso ( $\text{mg.kg}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ); FE é o fator de exposição ( $\text{dia}^{-1}$ ); C é a concentração do contaminante no meio em questão (solo, água subterrânea, água superficial) ( $\text{mg.L}^{-1}$  ou  $\text{mg.kg}^{-1}$ ); IR é a taxa de contato do receptor com o meio em questão ( $\text{L.dia}^{-1}$  ou  $\text{kg.dia}^{-1}$ ); EF é a frequência de exposição do receptor ( $\text{dias.ano}^{-1}$ ); ED é a duração de exposição do receptor (ano); BW é o peso corporal do receptor (kg); AT é o período médio de exposição (dias).

#### 2.2.4 Quantificação do risco

Em função do composto ou substância química de interesse – CQI, o risco pode ser caracterizado como carcinogênico ou não carcinogênico. Esta divisão é efetuada de acordo com as propriedades



dos CQI. Para os CQI que apresentam - a partir de estudos toxicológicos da relação dose-resposta de concentrações de CQI a um receptor - fator de carcinogenicidade ( $SF$  – *slope factor*), o risco, para o composto químico em questão a partir de uma via de exposição em questão, é caracterizado como carcinogênico, e calculado a partir da Equação 3.

$$Rc = I \times SF \quad (3)$$

Onde  $Rc$  representa o risco carcinogênico (adimensional);  $I$  a dose de ingresso ( $\text{mg.kg}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ) (Equação 1); e  $SF$  o *slope factor* ( $\text{mg/kg.dia}^{-1}$ ). O resultado obtido representa a probabilidade de um indivíduo adquirir câncer a partir do composto químico em questão e pela via de exposição em questão. Por exemplo,  $Rc$  de  $10^{-7}$ , representa a probabilidade de 1 indivíduo em 10.000.000 de adquirir câncer pela composto químico de interesse e pela via de exposição em questão.

O potencial de efeitos não carcinogênicos, também chama de índice de perigo ( $HQ$  – *hazard quotient*) é avaliado pela comparação entre a Dose de ingresso ( $I$ ) e a Dose de referência ( $RfD$ ). Os  $RfD$  são específicos de cada composto químico e determinados a partir de estudos toxicológicos de exposição de indivíduos à diferentes vias de exposição e durante diferentes intervalos de tempo (USEPA, 1989). O  $HQ$  assume que existe uma dose de referência, abaixo da qual, provavelmente não ocorrem efeitos nocivos à saúde de indivíduos ou populações, quando expostos a uma concentração de uma substância química. A Equação 4 apresenta a quantificação do risco não carcinogênico (índice de perigo).

$$HQ = \frac{I}{RfD} \quad (4)$$

Onde  $HQ$  é o risco não carcinogênico (adimensional);  $I$  é a dose de ingresso ( $\text{mg.kg}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ); e  $RfD$  é a dose de referência ( $\text{mg.kg}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ). Se a dose de ingresso para um cenário de exposição exceder o  $RfD$ , (relação for maior que 1), então existe um perigo de ocorrência de efeitos não carcinogênicos adversos à saúde (USEPA, 1989).

A quantificação dos riscos carcinogênico e não carcinogênico, a partir do somatório dos riscos de todas as vias de exposição ( $i$ ) e compostos químicos de interesse ( $j$ ), considerados no cenário de estudo, é chamado de risco carcinogênico total (Equação 5) e índice de perigo ou risco não carcinogênico total (Equação 6), respectivamente.

$$Rc = \sum Rc_{ij} \quad (5)$$

Onde Rc (adimensional) é o somatório dos riscos carcinogênicos calculados para as vias de exposição (i) e CQI(j).

$$HQ = \sum HQ_{ij} \quad (6)$$

Onde HQ (adimensional) é o somatório dos índices de perigo calculados para as vias de exposição (i) e CQI (j).

### 2.2.5 Quantificação das concentrações máximas aceitáveis

As CMA (Concentrações Máximas Aceitáveis), também conhecidas como SSTL (*Site Specific Target Levels*) são as máximas concentrações dos compostos químicos de interesse, no compartimento ambiental em questão, que não causem risco a saúde humana, caso ocorra uma situação de exposição (CETESB, 2001).

Para a quantificação da CMA é necessário o estabelecimento de um risco alvo carcinogênico ou risco alvo não carcinogênico (em virtude do composto químico de interesse). O risco alvo ou meta de risco é estabelecido em função da probabilidade máxima de ocorrência de efeitos adversos à saúde humana, a um indivíduo exposto a um CQI, em uma determinada via de exposição.

As concentrações máximas aceitáveis podem ser calculadas para um determinado composto químico de interesse, considerando somente uma via de exposição (Equações 7 e 8) ou considerando todas as vias de exposição (Equações 9 e 10) válidas para um determinado receptor ou grupo de receptores, ou seja, exposições simultâneas (CETESB, 2001).

$$CMA_C = \frac{Rc}{FE \times SF} \quad (7)$$

Em que  $CMA_C$  é a concentração máxima aceitável ( $mg.kg^{-1}$  ou  $mg.L^{-1}$ ) para compostos carcinogênicos,  $R_C$  é o risco alvo carcinogênico (adimensional), FE é o fator de exposição ( $dia^{-1}$ ) da via de exposição em questão; e SF o fator de carcinogenicidade do composto químico de interesse ( $mg/kg.dia$ )<sup>-1</sup>.

$$CMA_{NC} = \frac{R_{NC} \times RfD}{FE} \quad (8)$$

Em que  $CMA_{NC}$  é a concentração máxima aceitável ( $\text{mg.kg}^{-1}$  ou  $\text{mg.L}^{-1}$ ) para compostos não carcinogênicos,  $R_{NC}$  é o risco alvo não carcinogênico (adimensional);  $RfD$  é a dose de referência do composto químico de interesse ( $\text{mg.kg}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ); e  $FE$  é o fator de exposição da via de exposição em questão ( $\text{dia}^{-1}$ ).

$$CMA_{TC} = \frac{Rc}{\sum FE \times SF} \quad (9)$$

Em que  $CMA_{TC}$  é a concentração máxima aceitável total ( $\text{mg.kg}^{-1}$  ou  $\text{mg.L}^{-1}$ ) para compostos carcinogênicos,  $Rc$  é o risco alvo carcinogênico (adimensional),  $FE$  é o fator de exposição ( $\text{dia}^{-1}$ ) para a via de exposição e o receptor em questão; e  $SF$  o fator de carcinogenicidade do composto ( $\text{mg/kg.dia}^{-1}$ ) para o composto químico de interesse.

$$CMA_{NC} = \frac{R_{NC}}{\sum \frac{FE}{RfD}} \quad (10)$$

Em que  $CMA_{NC}$  é a concentração máxima aceitável ( $\text{mg.kg}^{-1}$  ou  $\text{mg.L}^{-1}$ ) para compostos não carcinogênicos,  $R_{NC}$  é o risco alvo não carcinogênico (adimensional);  $RfD$  é a dose de referência do composto químico de interesse ( $\text{mg.kg}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ); e  $FE$  é o fator de exposição ( $\text{dia}^{-1}$ ) para a via de exposição e o receptor em questão.

O estabelecimento de valores orientadores de qualidade para os meios físicos solo e água subterrânea, a partir do risco à saúde humana (*Risk Based Screening Level - RBSL*), vem se tornando prática comum de órgãos ambientais nacionais e internacionais (CONAMA, 2009; VROM; 2009; USEPA, 2014).

## **2.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA**

Atualmente, o mercado coloca à disposição uma gama de softwares para águas subterrâneas, de soluções analíticas e/ou numéricas, sendo uni, bi ou tridimensionais. O tipo de modelo empregado na avaliação de risco vai depender do cenário encontrado e dos resultados que se deseja obter (JOUSSEF, 2013). A maioria dos modelos de avaliação de risco à saúde humana, disponíveis no mercado, baseia-se na entrada de dados de forma determinística, por tanto são considerados modelos determinísticos. Exceção à regra, o RISC 4 apresenta entrada de dados das duas formas: probabilística ou determinística (SPENCE e WALDEN, 2001).

Modelos determinísticos são modelos que relacionam causa e efeito de maneira exata e, geralmente envolvem parâmetros físico-químicos que são características determinísticas do meio. Em quase todos os casos, equações diferenciais ordinárias formam a base matemática para os modelos. Já os modelos estocásticos, ou de estimativa de probabilidade, envolvem parâmetros estatísticos que não são facilmente reconhecíveis como características físico-químicas do meio. Não são baseados em física ou química. Suas previsões são baseadas em tendências de conjuntos de dados que os impedem de fornecerem estimativas exatas, quando ocorrem mudanças no sistema e nenhum dado novo é coletado após tais mudanças. Requerem base de dados extensa e complexa para serem precisos (BEDIENT *et al.*, 1999).

### **2.3.1 Processos de transporte e transformação de contaminantes nos modelos de avaliação de risco**

Os modelos de ARSH devem contemplar modelos matemáticos que simulem o transporte e a transformação dos contaminantes desde a sua origem, na fonte de contaminação até o contato com o receptor. Os modelos de transporte de contaminantes são modelos matemáticos simplificados, baseados nas propriedades físico-químicas das substâncias químicas de interesse e as propriedades e a natureza do meio na qual o contaminante estará em contato (WIEDEMEIER *et al.*, 1999a). Eles simulam processos físicos, químicos e biológicos, tais como advecção, dispersão, sorção, biodegradação e volatilização.

Os processos físicos advecção e dispersão e o processo químico sorção são os mais relevantes no transporte do contaminante em água subterrânea. Na advecção, os contaminantes migram com o fluxo da água subterrânea, não causando redução da massa ou concentração dos contaminantes. Na dispersão e na sorção pode ocorrer a redução da concentração dos contaminantes na água subterrânea. A redução de massa ocorre devido à biodegradação, principalmente, ou ainda pela volatilização, mas em taxas menores. (MACKAY *et al.*, 1985).

O transporte e transformação de contaminantes em água subterrânea segue o mesmo princípio do transporte do fluxo subterrâneo. A diferença é que no fluxo subterrâneo a “quantidade” transportada é a massa do fluido representada pela sua densidade, já no transporte de contaminantes, a “quantidade” é a massa do composto ou substância química representada em termos de concentração (BEAR e CHENG, 2010).

#### 2.3.1.1 Advecção

A advecção é o mecanismo de maior importância na migração de contaminantes (MACKAY *et al.*, 1985). Através deste mecanismo, o contaminante dissolvido é transportado com o fluxo da água subterrânea na velocidade intersticial do meio poroso. As propriedades do aquífero responsáveis pelo fluxo advectivo são: porosidade efetiva ( $\eta_e$ ), gradiente hidráulico ( $dh/dL$ ) e da condutividade hidráulica ( $K$ ). A velocidade linear (unidimensional) do contaminante, dissolvido em água subterrânea, devido à advecção e paralela a velocidade do fluxo subterrâneo, é dada pela Equação 11.

$$v_x = \frac{K}{\eta_e} \frac{dh}{dL} \quad (11)$$

#### 2.3.1.2 Dispersão hidrodinâmica

A dispersão hidrodinâmica é o processo de espalhamento da pluma de contaminantes dissolvidos em água subterrânea nas direções longitudinal e transversal ao fluxo subterrâneo e conseqüentemente na direção de migração da pluma. De acordo com Wiedemeier *et al* (1999a) este fenômeno é importante, pois, juntamente com o processo de infiltração, é responsável pela diluição dos contaminantes na água

subterrânea. A dispersão hidrodinâmica é composta pela dispersão mecânica e a difusão molecular.

A dispersão mecânica é a mistura ocasionada pelas variações locais da velocidade na zona saturada do subsolo. É um processo físico influenciado basicamente por três processos: variação da velocidade do fluxo através dos poros de vários tamanhos; comprimento do caminho do fluxo e a fricção variável dentro de um poro individual (WIEDEMEIER *et al.*, 1999a). A dispersão mecânica pode ser determinada através da Equação 12.

$$\text{Dispersão mecânica} = \alpha_x V_x \quad (12)$$

Onde  $\alpha_x$  é a dispersividade longitudinal e  $V_x$  a velocidade da água subterrânea ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

A difusão é o processo molecular de transporte de massa em que o soluto se move de uma área de alta concentração para uma área de baixa concentração. Este processo resulta do movimento molecular translacional, vibracional e rotacional do contaminante no meio líquido (MACKAY *et al.*, 1985). A difusão molecular de um contaminante na água subterrânea em estado estacionário e unidimensional é descrita pela 1ª Lei de Fick (Equação 13).

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (13)$$

Em que F é o fluxo de massa do soluto por unidade de área por unidade de tempo; D é o coeficiente de difusão; C é a concentração de soluto e  $dC/dx$  é o gradiente de concentração do soluto.

### 2.3.1.3 Sorção e Retardo

A sorção é o processo pelo qual os contaminantes dissolvidos particionam-se da água subterrânea e aderem às partículas da matriz do aquífero. A sorção de contaminantes dissolvidos na matriz do aquífero resulta no retardo dos contaminantes em relação à velocidade média do fluxo advectivo e na redução das suas concentrações em águas subterrâneas. A matéria orgânica e os minerais de argila são os componentes que têm maior influência no processo de sorção dentro de um aquífero. Na maioria dos aquíferos, é a fração orgânica que tende a controlar a sorção de hidrocarbonetos dissolvidos. Dessa forma, quanto

maior o teor de matéria orgânica no aquífero, maior será o retardo no deslocamento dos contaminantes. Além disso, quanto mais hidrofóbico for o composto, maior será o efeito da sorção (BEDIENT *et al.*, 1999).

A sorção dos contaminantes pode ser definida através do coeficiente de retardo (R), o qual é determinado a partir do coeficiente de distribuição assumindo sorção linear (Equação 14).

$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{n_e} \quad (14)$$

Em que  $\rho_b$  é a densidade aparente do aquífero;  $K_d$  é o coeficiente de distribuição e  $n_e$  é a porosidade efetiva.

#### 2.3.1.4 Biodegradação

A biodegradação é o principal mecanismo de atenuação natural que irá limitar o transporte dos contaminantes dissolvidos na subsuperfície (WIEDEMEIER *et al.*, 1999a). Durante o processo de biodegradação, os micro-organismos existentes no ambiente subterrâneo (micro-organismos nativos), que podem ser bactérias e fungos, transformam os compostos químicos em produtos menos tóxicos, reduzindo a massa desses contaminantes no ambiente subterrâneo.

As reações de biodegradação dos compostos orgânicos dissolvidos ocorrem em taxas específicas para cada composto. No ambiente subterrâneo, essas taxas estão relacionadas às condições ambientais, tais como: disponibilidade dos receptores de elétrons (Oxigênio, Nitrato, Sulfato, Ferro e Dióxido de carbono) que serão utilizados para oxidar os contaminantes; o pH numa faixa ideal que não iniba o crescimento dos micro-organismos; e a temperatura do ambiente subterrâneo que seja adequada para o desenvolvimento dos micro-organismos (CETESB, 2001). O modelo cinético de decaimento de primeira ordem é geralmente utilizado para quantificar a biodegradação dos contaminantes ao longo do tempo (Equação 15).

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\lambda t} \quad (15)$$

Onde  $C_0$  é a concentração inicial; C a concentração do soluto no tempo t; e  $\lambda$  o coeficiente de decaimento do soluto devido à biodegradação.

### 2.3.1.5 Influência das propriedades físico-químicas no transporte e transformação dos contaminantes.

Segundo USEPA (1989), as propriedades físico-químicas dos compostos envolvidos são relevantes para o entendimento dos mecanismos de liberação a partir da fonte, podendo afetar a velocidade e a concentração que atinge o receptor.

A importância relativa de cada uma das vias de exposição na quantificação do risco está relacionada às características físicas, químicas e toxicológicas da substância envolvida como também às propriedades do solo e ao comportamento dessa substância no solo. O entendimento desses fatores permite prever ou mesmo definir o compartimento alvo da substância, identificando a via dominante de exposição ao ser humano (CETESB, 2001). As propriedades físico-químicas mais relevantes são:

O Coeficiente de partição octanol/água ( $K_{ow}$ ) é a relação entre a concentração de uma substância dissolvida no octanol e a concentração na água, indicando sua hidrofobicidade (SHARMA e REDDY, 2004). Quanto maior o  $K_{ow}$ , maior é a tendência da substância em fixar-se na parte lipofílica do que na água (parte hidrofílica). É correlacionado também com as características de bioacumulação.

O Coeficiente de partição solo/água ( $K_{oc}$ ) é a medida da partição de uma substância entre a água e a fração orgânica do solo ou do aquífero (SHARMA e REDDY, 2004). Quanto maior o  $K_{oc}$ , maior a tendência da substância orgânica se adsorver na matéria orgânica do solo.

O Coeficiente de distribuição ( $K_d$ ) é a medida que indica a relação linear entre a massa da substância adsorvida no solo e a concentração na solução do solo (SHARMA e REDDY, 2004). Quanto maior o  $K_d$ , maior a tendência de o contaminante ficar adsorvido no solo ou sedimento.

A pressão de vapor é a medida que indica a tendência de volatilização de uma substância a partir do solo. Quanto maior a pressão de vapor, maior a tendência da substância de migrar do solo para a atmosfera (SHARMA e REDDY, 2004).

A constante de Henry representa a tendência de volatilização de uma substância a partir do meio aquoso (dissolvida na água intersticial) (SHARMA e REDDY, 2004). Quanto maior a Constante de Henry, maior é a tendência de uma substância orgânica passar ao estado gasoso do que permanecer na água.



### 2.3.2 Estudos comparativos entre modelos de avaliação de risco à saúde humana

Diversos estudos comparativos entre modelos de avaliação de risco à saúde humana já foram realizados. Desde estudos qualitativos, destacando as principais propriedades de cada modelo a análises quantitativas e de sensibilidade para determinação dos parâmetros de entrada ou parâmetros *default*, de cada modelo, mais influentes na quantificação do risco e das concentrações máximas aceitáveis.

Para a execução de uma ARSH em um *site* impactado por hidrocarbonetos de petróleo, Guimarães (2003), realizou um estudo qualitativo e comparativo entre os *softwares* RISC 4.0, RBCA *ToolKit*, API-DSS, MEPAS, RISK\*ASSISTANT e SMARTRISK - baseados na metodologia *Risk-Based Corrective Action* (ASTM, 2010) - e C-SOIL baseado na metodologia Holandesa. O modelo RISC 4.0 foi selecionado, em virtude do banco de dados contemplar todos os compostos químicos de interesse (presentes no *site* impactado objeto de estudo), de ter um modelo de volatilização de compostos químicos mais robusto, de possibilitar o transporte de contaminantes na zona vadosa e de contemplar um maior número de vias de exposição.

Em um *site* industrial contaminado no sul de Taiwan, Chang *et al.* (2004) realizaram um estudo comparativo determinístico e estocástico entre os modelos RBCA *ToolKit* e CalTOX. Foram selecionados nove compostos químicos orgânicos e com propriedades carcinogênicas e a via de exposição inalação de compostos provenientes do solo subsuperficial. Foram determinadas as concentrações máximas aceitáveis com os modelos. Na discussão dos resultados, verificaram a influência do fator de carcinogenicidade (*Slope Factor* - SF), a meia vida dos contaminantes assumidos pelo modelo CalTOX, a metodologia empregada e os modelos de dispersão de compostos químicos na atmosfera de cada *software*. Na análise estatística foi realizada análise de sensibilidade visando o “ranqueamento” dos parâmetros de entrada que mais contribuem para a quantificação do risco.

Chen e Ma (2006), a partir de uma área no norte de Taiwan com contaminação de Tricloroetileno e Tetracloroetileno em solo e água subterrânea, realizaram um estudo comparativo entre os modelos MEPAS, MMSOILS e CalTOX. Uma análise qualitativa das vias de exposição possíveis de cada modelo foi realizada. Em seguida, a quantificação do risco para cada via de exposição, quantificação do risco total e a verificação da contribuição do risco de cada via de exposição no risco total quantificado. Em virtude dos resultados apresentados, foi

feito o levantamento da formulação matemática e os modelos de transporte e transformação de contaminantes empregados pelos *softwares*. Por fim, análise de sensibilidade dos parâmetros que mais influenciam no risco quantificado para os três *softwares*.

Pinedo *et al.*, (2014) aplicaram os modelos *RBCA ToolKit*, *C-SOIL* e *Risk-net* para ARSH em um posto de combustível com contaminação por hidrocarbonetos derivados do petróleo na região de Cantábria na Espanha. Os receptores considerados no estudo, foram crianças residentes no entorno do posto de combustível. Os compostos químicos de interesse simulados foram os Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH) Total e Fracionado. As rotas de exposição consideradas : ingestão de solo, contato dérmico com solo, ingestão de água e inalação de vapores. Foi quantificado o risco carcinogênico total e não carcinogênico total para TPH Fracionado e o risco não carcinogênico por rota. Na discussão dos resultados foi verificada a influência dos modelos de transporte e transformação de contaminantes de cada programa na quantificação do risco não carcinogênico por rota e qual rota apresenta maior índice de perigo (risco não carcinogênico).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 METODOLOGIA *RISK BASED CORRECTIVE ACTION*

A metodologia de avaliação de risco à saúde humana aplicada neste trabalho foi a *Risk-Based Corrective Action* – RBCA. Elaborada pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*), é um procedimento de tomada de decisão para avaliação de risco e resposta a lançamentos de produtos químicos com base na proteção à saúde e ao meio ambiente. Inicialmente, a metodologia foi criada para atender cenários de contaminação por vazamento de petróleo e derivados (norma ASTM E1739-95), e posteriormente foi ampliada para lançamentos de outras substâncias químicas (norma ASTM E2081-00) (JOUSSEF, 2013).

O RBCA é uma ferramenta amplamente utilizada pelas autoridades ambientais dos Estados Unidos para o gerenciamento de áreas contaminadas e, conforme a maioria das metodologias mais recentes de avaliação de risco ela segue as recomendações do estabelecido no *Risk Assessment Guidance for Superfund* (USEPA 1989), ao adotar os quatro elementos-chave de: coleta e avaliação de dados, avaliação da toxicidade, avaliação da exposição, caracterização e quantificação dos riscos e gerenciamentos do risco.

Segundo Spence e Walden (2001) a metodologia RBCA permite a tomada de decisão em áreas contaminadas em situações com pouca disponibilidade de recursos e tempo, por integrar, de forma direcionada e consistente, a avaliação da área contaminada, a escolha da melhor técnica de remediação disponível e o posterior monitoramento da área. Possibilita, ainda, a escolha de alternativas inovadoras e de boa relação custo-benefício que garantam a proteção à saúde humana e ao meio ambiente.

A metodologia RBCA compõe uma sequência lógica de procedimentos e decisões a serem tomadas, desde a suspeita da contaminação até a definição de estratégias de gerenciamento do risco. Estes procedimentos são organizados em três níveis (*Tier 1, Tier 2 e Tier 3*) os quais tornam-se progressivamente mais específicos e complexos à medida que se exige um maior grau de detalhamento da investigação ambiental do local avaliado.

A Etapa 1 – *Tier1* consiste na comparação das concentrações dos compostos e substâncias químicos de interesse (CQI) determinadas na área de estudo com valores de referência genéricos baseados no risco

(RBSL - *Risk-Based Screening Levels*) tabelados pelos órgãos ambientais e de saúde (ASTM, 2010). O nível 1 (Tier 1) é o mais conservador e de execução mais simples, pois assume que os receptores estão localizados dentro da área-fonte, imediatamente juntos à fonte de contaminação (JOUSSEF, 2013). Se a Etapa 1 não for suficiente para determinar resultados satisfatórios em termos de proteção à saúde, custos ou aspectos tecnológicos para a remediação, a Etapa 2 deve ser realizada.

O estudo mais aprofundado na Etapa 2 – *Tier2* possibilita a definição do risco e das metas de remediação em função das especificidades do local, mantendo sempre a premissa principal de proteção à saúde humana e ao meio ambiente. Na Etapa 2 são estabelecidos valores de referência específicos para a área de estudo (SSTL - *Site-Specific Target Levels* ou CMA - Concentrações Máximas Aceitáveis), associados aos receptores e às vias de exposição pertinentes, utilizados para comparar as concentrações dos CQI e auxiliar na tomada de decisão sobre a remediação. Os SSTL são determinados por meio de simulações matemáticas dos cenários de contaminação, a partir de parâmetros específicos da área de interesse. Destaca-se também, que nesta Etapa pode ser considerada a presença de receptores próximos e afastados da fonte (ASTM, 2010).

Se os resultados da Etapa 2 forem avaliados como impraticáveis ou insuficientes, a Etapa 3 – *Tier 3* poderá ser realizada. Esta também utiliza modelos matemáticos para determinação dos SSTL. No entanto, envolve um maior número de informações da área de estudo ao longo do tempo e a utilização de modelos matemáticos mais robustos (ASTM, 2010). Cabe salientar que a ASTM E1739-95 não especifica o modelo matemático a ser utilizado nas etapas 2 e 3, mas orienta sobre o procedimento da quantificação e as equações que devem ser contempladas exclusivamente no cálculo do risco (não na simulação da exposição).

### **3.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS EMPREGADOS**

Os *softwares* utilizados como objetos deste estudo foram aqueles que são geralmente empregados na quantificação do risco à saúde humana no Brasil, a saber: RISC 4.0 versão 4.01 (SPENCE e WALDEN, 2001), RBCA *ToolKit* versão 2.6 (CONNOR *et al.*, 2007) e Planilhas de Avaliação de Risco da CETESB atualização de maio de 2013 (CETESB, 2014b). Mais recentemente, os órgãos ambientais estão

aceitando as avaliações de risco elaboradas com o simulador SCBR versão 3.1 (CORSEUIL *et al.*, 2006).

Os modelos RISC 4, RBCA *Toolkit* e Planilhas CETESB são amplamente aceitos por órgãos ambientais brasileiros e possuem alta empregabilidade em projetos de ARSH no cenário nacional (GUIMARÃES, 2003; COUTO, 2006; JOUSSEF, 2013). Os *softwares* em questão se baseiam na metodologia RBCA de avaliação de risco à saúde humana, tornando desta forma, as análises comparativas quantitativas e qualitativas entre os modelos, mais pertinentes.

O modelo matemático SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco (CORSEUIL *et al.*, 2006), com a intensificação do seu emprego em estudos ambientais da PETROBRAS, se estabelece como uma nova ferramenta na avaliação de risco à saúde humana, possibilitando ao usuário a implementação e quantificação do risco a partir de diferentes metodologias de ARSH.

As duas plataformas computacionais tipo *desktop*, nas quais os modelos empregados neste trabalho encontram-se instalados e que foram utilizadas para as simulações matemáticas são: Intel(R) Core (TM) i7-2600 3.40 GHz de 4,00 GB de memória RAM e Intel(R) Core (TM)2-6300 1.86 GHz de 960 MB de memória RAM .

### 3.2.1 RISC 4.0

Desenvolvido por Lynn Spence (Spence *Engineering Company*, Inc.) e Terry Walden (BP *Oil International*), inicialmente somente para compostos derivados de petróleo e posteriormente para metais e outros compostos organizados. Contém extenso banco de dados de contaminantes, incluindo TPH Total e Fracionados. Disponibiliza 14 vias de exposição, incluindo ingestão de vegetais e irrigação. Aceita entrada de dados individuais ou em grupos com tratamento probabilístico utilizando a Análise de Monte Carlo. É bastante “amigável” e permite escolha de até 02 receptores simultaneamente entre lista de 08. Permite saída de dados individual ou cumulativamente por meio, vias e receptor, utilizando tabelas e gráficos compatíveis em *.xls* e *.doc*. Quantifica o transporte e transformação de contaminantes entre os compartimentos ambientais água superficial, água subterrânea, solo e ar, a partir de uma gama de modelos de transporte e transformação de contaminantes disponíveis. Calcula o risco e as concentrações máximas aceitáveis (GUIMARÃES, 2003).

Permite, a realização da Etapa 1 (*Tier 1*) da metodologia *RBCA* (ASTM, 2010), a partir de uma planilha (TIER 1.xls) com extenso banco de dados de contaminantes. Os valores dos *RBSL* genéricos, tabelados em legislações, são quantificados a partir do banco de dados de compostos químicos do software e das equações e modelos preconizados na metodologia *RBCA* (ASTM, 2010; SPENCE e WALDEN, 2001). Possibilita também a comparação de concentrações em águas superficiais e sedimentos com valores orientadores de legislações ambientais dos Estados Unidos, Reino Unido, Austrália, Nova Zelândia, Canada e União Europeia (SPENCE e WALDEN, 2001).

O banco de dados do RISC 4 é composto por 87 compostos e substâncias químicas de interesse. É possível simular simultaneamente, em um cenário de quantificação do risco e/ou concentrações máximas aceitáveis, 20 CQI. O software permite ao usuário modificar as propriedades físico-químicas e toxicológicas das CQI, bem como adicionar novas CQI ou remove-las (SPENCE e WALDEN, 2001).

O software RISC 4 possibilita ao usuário escolher entre 16 vias de exposição. Para cada via de exposição é associado um compartimento ambiental contaminado ao qual o receptor estará em contato. O RISC 4, possibilita ao usuário escolher entre 05 compartimentos ambientais contaminados: solo superficial, ar em ambientes abertos, ar em ambientes fechados, água subterrânea e água superficial (SPENCE e WALDEN, 2001). As vias de exposição e os meios contaminados são apresentados na Tabela 3.1.

Associados aos compartimentos ambientais contaminados, o usuário também deve escolher a fonte potencial de contaminação (caso não seja exposição direta ao contaminante) e o modelo de transporte do contaminante, da fonte potencial para o compartimento ambiental ao qual o receptor está em contato. Os modelos acoplados ao RISC 4 são listados na Tabela 3.2.

O RISC 4 contempla 04 receptores em seu banco de dados: adulto para uso do solo residencial, criança para uso do solo residencial, transeunte e trabalhador. As simulações para quantificação do risco e/ou das concentrações máximas aceitáveis permitem o máximo de 02 receptores serem selecionados simultaneamente. Os parâmetros de exposição dos receptores necessários à quantificação da exposição podem ser determinísticos ou estocásticos. Para a análise determinística os parâmetros de exposição podem ser “típicos” ou “conservadores”, chamados *Reasonable Maximum Exposure (RME)*. Segundo Guimarães (2003), os valores “típicos” representam a média da população, enquanto

que o termo *RME*, originalmente utilizado pela USEPA, se refere ao percentual de 85 a 95% de uma distribuição probabilística acumulada, sendo, portanto, conservador. Os receptores do modelo RISC 4, bem como os parâmetros de exposição “típicos” e *RME* são expostos na Tabela 3.3.

Cabe justificar a existência de uma nova versão do modelo RISC (versão 5.0), na qual foram acrescentadas novas *features*, vias de exposição e modelos de transporte e transformação de contaminantes. Salienta-se que estas modificações não são significativas na implementação do modelo em questão neste trabalho. Deste modo, optou-se pela utilização da versão 4.0, o qual, conforme frisado anteriormente é mais recorrentemente utilizado em projetos de ARSH no cenário nacional.

Tabela 3.1. Meios contaminados e vias de exposição do RISC 4.

<b>Meio Contaminado</b>	<b>Via de ingresso</b>
Solo superficial	Ingestão
	Contato dérmico
	Ingestão de vegetais
Água subterrânea	Ingestão
	Contato dérmico
	Inalação (chuveiro)
	Ingestão (uso d'água para irrigação)
	Inalação de compostos voláteis (uso d'água para irrigação)
	Contato dérmico (uso d'água para irrigação)
	Ingestão de vegetais
Ar (ambientes abertos)	Inalação (água subterrânea ou subsolo impactado)
Ar (ambientes fechados)	Inalação (água subterrânea ou subsolo impactado)
Água superficial	Ingestão
	Contato dérmico

Fonte: Adaptado de Spence e Walden (2001).

Tabela 3.2. Modelos de transporte e transformação de contaminantes disponíveis ao usuário no RISC 4.

<b>Modelo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Posição da fonte de contaminação</b>	<b>Ponto de exposição do receptor</b>
Zona vadosa (acoplado ao modelo de água subterrânea) -	Considera os fenômenos de volatilização e difusão de vapores da fonte de contaminação para a atmosfera, lixiviação da fonte para água subterrânea e advecção e dispersão dos contaminantes em água subterrânea	Solo subsuperficial (zona não saturada)	Água Subterrânea
Fonte em fase dissolvida	Considera os fenômenos de dispersão, adsorção (retardo) e degradação em água subterrânea	Água subterrânea (zona saturada)	Água Subterrânea
Solo saturado	Considera as variações temporais do nível de água do aquífero. Também, considera os fenômenos de dispersão, adsorção (retardo) e degradação em água subterrânea	Entre a zona saturada e não saturada	Água Subterrânea

Fonte: Adaptado de Spence e Walden, (2001) e Guimarães (2003).



Tabela 3.2 Modelos de transporte e transformação de contaminantes disponíveis ao usuário no RISC 4 (continuação).

<b>Modelo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Posição da fonte de contaminação</b>	<b>Ponto de exposição do receptor</b>
Johnson e Ettinger	Considera fenômenos de difusão e advecção de contaminantes na zona não saturada para o ar em ambientes fechados ou abertos. Possibilita a inserção de uma "lente" de solo com propriedades distintas. Não considera a degradação dos contaminantes.	Solo subsuperficial (zona não saturada)	Ar (ambientes abertos ou fechados)
Camada Dominante	Transporte de vapores em até 03 horizontes de solo de propriedades distintas. Considera o fenômeno de degradação dos contaminantes.	Solo subsuperficial (zona não saturada)	Ar (ambientes abertos ou fechados)
Oxigênio limitado	Considera apenas uma camada de solo. Calcula a distância a partir da fonte de contaminação onde as concentrações de oxigênio serão suficientes para a ocorrência da degradação aeróbia.	Solo subsuperficial (zona não saturada)	Ar (ambientes abertos ou fechados)
Emissão de vapores da água subterrânea	Difusão de vapores dos contaminantes em água subterrânea através da zona vadosa	Água subterrânea (zona saturada)	Ar (ambientes fechados)

Fonte: Adaptado de Spence e Walden, (2001) e Guimarães (2003).

Tabela 3.3. Parâmetros de exposição dos receptores do RISC 4.

Parâmetros de exposição	Unidade	Receptor			
		Trabalhadores		Transeuntes	
		RME	Típico <sup>1</sup>	RME	Típico <sup>1</sup>
Duração da exposição*	anos	25	8	12	9
Duração da exposição para inalação em ambientes fechados	anos	25	4	-	-
Expectativa de vida	anos	70	70	70	70
Massa corpórea	kg	70	70	42	42
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes abertos	horas/dia	8	4	3	1,5
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes fechados	horas/dia	8	4	-	-
Frequência de exposição para contato dérmico com solo superficial e ingestão de solo	dias/ano	250	125	36	10
Frequência de exposição para contato dérmico com a água subterrânea	dias/ano	250	250	-	-
Frequência da exposição para inalação de vapores em ambientes fechados	dias/ano	250	125	-	-
Frequência da exposição para inalação de vapores em ambientes abertos	dias/ano	250	125	52	26
Taxa de ingestão de solo	mg/dia	100	40	50	40
Taxa de inalação diária de vapores em ambientes fechados	m3/hora	2,50	0,83	-	-
Taxa de inalação diária de vapores em ambientes abertos	m3/hora	2,50	0,83	2,30	1,68
Taxa de ingestão diária de água	L/dia	1,00	0,50	-	-
Fator de aderência do solo na pele	mg/cm <sup>2</sup> .evento	0,20	0,20	0,20	0,20
Área superficial da pele disponível para contato dérmico com solo e água subterrânea	cm <sup>2</sup>	13.110	2.024	9.434	1.540

Tabela 3.3. Parâmetros de exposição dos receptores do RISC 4 (continuação).

Parâmetros de exposição	Unidade	Receptor			
		Res. Adultos		Res. Crianças	
		RME	Típico <sup>1</sup>	RME	Típico <sup>1</sup>
Duração da exposição*	anos	30	9	6	6
Duração da exposição para inalação em ambientes fechados	anos	30	9	6	6
Expectativa de vida	anos	70	70	70	70
Massa corpórea	kg	70	70	15	15
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes abertos	horas/dia	3	1	24	2
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes fechados	horas/dia	24	18	24	20
Frequência de exposição para contato dérmico e ingestão de solo superficial	dias/ano	350	40	350	130
Frequência de exposição para demais vias de exposição	dias/ano	350	350	350	350
Taxa de ingestão de solo	mg/dia	100	40	200	90
Taxa de inalação diária de vapores em ambientes fechados	m3/hora	0,83	0,63	0,63	0,63
Taxa de inalação diária de vapores em ambientes abertos	m3/hora	0,83	0,83	0,83	0,83
Taxa de ingestão diária de água	L/dia	2,00	1,10	1,00	0,50
Fator de aderência do solo na pele	mg/cm <sup>2</sup> .evento	0,20	0,20	0,20	0,20
Área superficial da pele disponível para contato dérmico com solo e água subterrânea	cm <sup>2</sup>	5.750	2.024	4.004	884

Obs.: \*Para todas as vias de exposição à exceção de inalação em ambientes fechados; "-" via de exposição não contemplada para o receptor em questão; RME - Reasonable Maximum Exposure (receptor apresenta valores conservadores dos parâmetros de exposição); <sup>1</sup> receptor apresenta valores típicos dos parâmetros de exposição).

Fonte: Adaptado de Spence e Walden, (2001).

### 3.2.2 RBCA ToolKit for Chemical Releases

O software *RBCA ToolKit for Chemical Releases*, foi desenvolvido pela *Groundwater Services, Inc.* e financiado pelas empresas de petróleo Shell e Mobil. Possibilita a realização das três etapas (*Tiers 1, 2 e 3*) preconizadas na norma ASTM E-1739-95 *Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites* (ASTM, 2010).

Calcula o transporte e transformação de contaminantes nos compartimentos ambientais, o risco, o índice de perigo e as concentrações máximas aceitáveis específicas para a área de estudo, por via de exposição e por composto químico de interesse (GUIMARÃES, 2003; CONNOR *et al.*, 2007). O modelo possui também a opção *Specified Water Quality Criteria* onde são comparadas as concentrações dos contaminantes dissolvidos em corpos d' água superficial (a partir da descarga de um aquífero contaminado) com valores orientadores de legislações estaduais e federais dos Estados Unidos. Ainda, possibilita o cálculo de valores orientadores de contaminantes no solo a partir dos dispostos no *Contaminated Land Exposure Assessment* do Reino Unido.(CONNOR *et al.*, 2007)

Possibilita ao usuário, um algoritmo de depleção da fonte de contaminação, de modo que, os processos biológicos e físico-químicos de volatilização, dissolução e lixiviação na fonte de contaminação, ao longo do tempo, sejam contemplados (CONNOR *et al.*, 2007).

O *RBCA ToolKit* possibilita ao usuário 13 vias de exposição. As vias de exposição ingestão de água subterrânea e inalação de vapores em ambientes abertos e fechados permitem ao usuário a definição de 01 tipo de receptor *on-site* (acima da fonte de contaminação) e até 02 receptores *off-site* à diferentes distâncias – definidas pelo usuário – da fonte de contaminação. Para as demais vias de exposição é possível selecionar somente 01 tipo receptor *on-site*. As vias de exposição contempladas pelo modelo *RBCA ToolKit*, são apresentadas na Tabela 3.4

Tabela 3.4. Vias de exposição do modelo RBCA *ToolKit*.

<b>Fonte primária (origem da contaminação)</b>	<b>Via de Exposição</b>
Água subterrânea	Ingestão de água subterrânea contaminada
Água subterrânea	Ingestão e contato dérmico com água subterrânea contaminada a partir da natação
Água subterrânea	Consumo de pescados
Água subterrânea	Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea contaminada
Água subterrânea	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea contaminada
Solo subsuperficial	Ingestão de água subterrânea contaminada partir da lixiviação de solo subsuperficial contaminado
Solo subsuperficial	Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial contaminado
Solo subsuperficial	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial contaminado
Solo subsuperficial	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea contaminada a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado
Solo superficial	Ingestão acidental de solo contaminado
Solo superficial	Contato dérmico com solo contaminado
Solo superficial	Inalação de vapores e/ou partículas provenientes de solo superficial impactado
Solo superficial	Ingestão de vegetais

O modelo possui 05 receptores *default*: crianças (até 06 anos de idade), adolescentes (até 12 anos de idade) e adultos para uso do solo residencial, trabalhadores comerciais e trabalhadores de obras civis de construção. Possui ainda um receptor “*user defined*” no qual, cabe ao usuário, à definição de todos os parâmetros de exposição, necessários a quantificação do risco e das concentrações máximas aceitáveis (CONNOR *et al.*, 2007). O receptor trabalhador de obras civis, caracterizado para exposições de curta duração, somente pode ser selecionado para as vias de exposição relacionadas ao solo superficial e inalação de vapores em ambientes abertos. Os receptores do modelo RBCA *ToolKit for Chemical Releases* e os parâmetros de exposição associados são apresentados na Tabela 3.5.

O banco de dados do programa é composto por mais de 600 compostos e substâncias químicas, incluindo, frações de Hidrocarbonetos Totais de Petróleo – TPH, Organoclorados, Pesticidas, Solventes e Substâncias metálicas. Os parâmetros físico-químicos e toxicológicos dos compostos químicos de interesse são editáveis pelo usuário.

O RBCA *ToolKit* possibilita ao usuário a escolha de diferentes modelos de transporte e transformação de contaminantes entre os compartimentos ambientais solo, ar e água.

Para os processos de volatilização de substâncias químicas a partir de fontes de contaminação em solo ou água subterrânea, relacionados as vias de exposição de inalação de vapores em ambientes abertos o usuário pode escolher entre o modelo de Jury, descrito por USEPA (1996) e as equações para determinação do fator de volatilização da norma ASTM E-1739-95 (2010). Estes modelos são recomendados para os casos em que a fonte de contaminação está posicionada próxima à superfície do solo. No caso da fonte de contaminação estar a grandes profundidades no solo subsuperficial ou na água subterrânea é recomendada a utilização do modelo de Johnson e Ettinger (ASTM, 2010) combinado a um dos dois modelos anteriormente citados.

Para os processos de volatilização de vapores a partir de fontes de contaminação em solo ou água subterrânea e a sua intrusão em ambientes fechados (relacionados as vias de exposição de inalação de vapores em ambientes fechados) o usuário pode escolher entre o modelo de Johnson e Ettinger ou o modelo de Fluxo de Massa acoplado ao modelo de Johnson e Ettinger. Caso o receptor esteja acima da fonte de contaminação (*on-site*), estando a fonte de contaminação posicionada na camada de solo subsuperficial ou em água subterrânea utiliza-se

diretamente o modelo de Johnson e Ettinger. Caso haja uma fonte de contaminação em água subterrânea afastada do local onde se encontra o receptor o *software* disponibiliza o modelo de Fluxo de Massa (McHUGH *et al.*, 2003), o qual é acoplado ao modelo de Johnson Ettinger, para o cálculo da intrusão dos vapores, provenientes da pluma do contaminante em água subterrânea, no ambiente fechado onde se encontrado o receptor.

O processo de lixiviação de contaminantes presentes no solo subsuperficial até a água subterrânea pode ser resolvido a partir de dois modelos disponíveis ao usuário pelo *RBCA ToolKit*. O primeiro são as equações dispostas na norma ASTM E-1739-95 (2010) que assumem que o contaminante lixiviado, a partir da percolação da água de chuva infiltrada, se mistura diretamente ao fluxo de água subterrânea. O segundo modelo, SAM – *Soil Attenuation Model*, é uma adaptação das equações da norma ASTM E-1739-95 (2010) com a atenuação das concentrações dos contaminantes devido ao fenômeno da sorção durante o processo de lixiviação no solo subsuperficial.

O fenômeno de dissolução e transporte dos contaminantes, em água subterrânea e a partir de uma fonte na zona saturada, é descrito pelo modelo de Domenico. O *RBCA ToolKit* permite ao usuário escolher se o modelo de Domenico considerará ou não o fenômeno de degradação do contaminante, em água subterrânea, a partir da cinética de primeira ordem de decaimento da concentração do contaminante O *software*, possibilita ainda, utilizar o modelo BIOSCREEN (NEWELL *et al.*, 1996) associado ao modelo de Domenico, para o fenômeno da biodegradação dos contaminantes por aceptores de elétrons.

Tabela 3.5. Parâmetros de exposição dos receptores do modelo RBCA *ToolKit*.

Parâmetro de exposição	Unidade	Receptor				
		Criança	Residentes Adolescente	Adulto	Trabalhador comercial	Trabalhador de obras civis
Duração da exposição	anos	6	12	30	25	1
Tempo médio para efeitos carcinogênicos	dias	25.550	25.550	25.550	25.550	25.550
Tempo médio para efeitos não carcinogênicos	dias	2.190	4.380	10.950	9.125	365
Massa corpórea	kg	15	35	70	70	70
Tempo de exposição para inalação vapores	anos	30	30	30	30	30
Frequência de exposição para contato dérmico com solo superficial	dias/ano	350	350	350	250	180
Frequência de exposição para contato dérmico com água subterrânea	dias/ano	350	350	350	250	180
Frequência da exposição	dias/ano	350	350	350	250	180
Taxa de ingestão de solo	mg/dia	200	200	100	50	100
Taxa de ingestão diária de água	L/dia	1	1	2	1	1
Fator de aderência do solo na pele	mg/cm <sup>2</sup> .evento	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Área superficial da pele disponível para contato dérmico com solo e água subterrânea	cm <sup>2</sup>	2.023	2.023	3.160	3.160	3.160

Fonte: Adaptado de (CONNOR *et al.*, 2007).



### 3.2.3 Planilhas de Avaliação de Risco da CETESB

As planilhas CETESB foram desenvolvidas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, a partir da determinação da Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E, de 22 de junho de 2007. O objetivo da criação das planilhas, segundo CETESB (2014b) é a execução de projetos de avaliação de risco de saúde humana, para áreas contaminadas sob investigação, de maneira padronizada e de forma otimizada.

As planilhas CETESB possibilitam a quantificação dos riscos para substâncias não carcinogênicas e carcinogênicas, individual e cumulativo, considerando os cenários de exposição e substâncias químicas selecionadas pelo usuário, bem como o cálculo das concentrações máximas aceitáveis para essas substâncias. Para tanto, incluem bancos de dados com informações sobre as propriedades físico-químicas e toxicológicas de 755 compostos e substâncias químicas de interesse. Possui uma interface simplificada de entrada de dados, associada a relatórios automáticos de resultados (CETESB, 2014b).

A quantificação do risco pode ser realizada a partir de 16 vias de exposição. Todas as vias de exposição estão disponíveis, para a quantificação do risco, aos receptores residenciais crianças ou adultos (meio rurais ou urbanos). Para o receptor trabalhador comercial/industrial não é possível o cálculo do risco para a via de exposição ingestão de vegetais a partir do solo superficial contaminado, enquanto que, para o trabalhador de obras civis ou de escavação, as seguintes vias de exposição não estão disponíveis ao usuário: ingestão de vegetais a partir do solo superficial contaminado; ingestão, inalação e contato dérmico, em atividades recreacionais, com água superficial contaminada; e ingestão e contato dérmico com sedimentos contaminados. As vias de exposição contempladas pelas Planilhas CETESB são apresentadas na Tabela 3.6

Tabela 3.6. Vias de exposição das Planilhas CETESB.

<b>Meio contaminado</b>	<b>Via de exposição</b>
Solo superficial	Inalação de vapores ou partículas
Solo superficial	Contato dérmico
Solo superficial	Ingestão
Solo superficial	Ingestão de vegetais
Solo subsuperficial	Inalação de vapores em ambientes abertos
Solo subsuperficial	Inalação de vapores em ambientes fechados
Solo subsuperficial	Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação
Água subterrânea	Inalação de vapores em ambientes abertos
Água subterrânea	Inalação de vapores em ambientes fechados
Água subterrânea	Contato dérmico
Água subterrânea	Inalação a partir de atividades de recreação
Água superficial (atividades de recreação)	Inalação
Água superficial (atividades de recreação)	Ingestão
Água superficial (atividades de recreação)	Contato dérmico
Sedimento	Ingestão
Sedimento	Contato dérmico

Fonte: Planilhas CETESB. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/planilhas-para-avaliacao-de-risco/8-planilhas>.

Possibilita a escolha de 06 receptores entre residentes em áreas urbanas crianças, residentes em áreas urbanas adultos, residentes em áreas rurais crianças, residentes em áreas rurais adultos, trabalhadores comerciais e/ou industriais e trabalhadores de obras civis e de escavação (CETESB, 2014b). Os parâmetros de exposição dos receptores e do meio físico, foram ajustados, segundo CETESB (2014b) a realidade do estado de São Paulo. Os receptores e os parâmetros de exposição das Planilhas CETESB são apresentados na Tabela 3.7. Para os receptores residenciais crianças ou adultos, em ambientes urbanos ou rurais e trabalhadores comerciais/industriais é possível que o receptor esteja acima da fonte de contaminação – *on-site*, ou distante da fonte de contaminação – *off-site*. Para receptores off-site o usuário deverá determinar a distância entre a fonte de contaminação e o ponto de exposição do receptor. Os receptores trabalhadores de obras civis ou de escavação, somente poderão ser posicionados acima da fonte de contaminação.

Os cálculos para quantificação dos riscos carcinogênicos e não carcinogênicos e das concentrações máximas aceitáveis têm como base o procedimento descrito no RAGS –*Risk Assessment Guidance for Superfund* - Volume I - *Human Health Evaluation Manual* (USEPA, 1989) (CETESB, 2014b).

O transporte e a transformação dos contaminantes na água subterrânea é realizado a partir do modelo de Domenico, o qual considera os processos de advecção (unidimensional) dispersão (tridimensional) sorção dos contaminantes no solo e atenuação dos contaminantes a partir de processos biológicos e químicos ao longo do tempo. Para os processos de volatilização de substâncias químicas a partir de fontes de contaminação no subsolo o modelo de Jury *et al* é utilizado. O modelo de Johnson e Ettinger é utilizado para o transporte advectivo e difusivo de vapores de contaminantes presentes no subsolo para ambientes abertos e fechados (USEPA 1996; CETESB 2014b).

Tabela 3.7. Parâmetros de exposição dos receptores disponíveis ao usuário pelas Planilhas CETESB.

Parâmetros de exposição	Unidade	Receptor		
		Residentes em áreas rurais		Trabalhador em obras civis ou de escavação
		Criança	Adulto	
Duração da exposição	anos	6	72	2
Expectativa de Vida	anos	72	72	72
Tempo médio para efeitos carcinogênicos	dias	26.280	26.280	26.280
Tempo médio para efeitos não carcinogênicos	dias	2.190	26.280	730
Massa corpórea	kg	15	63	70
Tempo de exposição para contato dérmico com água subterrânea	horas/dia	2	4	8
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes abertos	horas/dia	8	8	8
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes fechados	horas/dia	16	16	8
Frequência da exposição	dias/ano	350	350	290
Frequência de eventos para contato dérmico com o solo	eventos/dia	1	1	1
Taxa de ingestão de solo	mg/dia	200	100	200,0
Taxa de inalação diária em ambientes fechados	m <sup>3</sup> /hora	0,62	0,95	1,20
Taxa de inalação diária em ambientes abertos	m <sup>3</sup> /hora	0,78	1,2	1,20
Taxa de ingestão diária de água	L/dia	1	2	1,00
Fator de aderência do solo na pele	mg/cm <sup>2</sup> .evento	0,2	0,07	0,20
Área superficial da pele disponível para contato dérmico	cm <sup>2</sup>	4783	10367	2457

Tabela 3.7. Parâmetros de exposição dos receptores disponíveis ao usuário pelas Planilhas CETESB (continuação).

Parâmetros de exposição	Unidade	Receptor		
		Residentes em áreas urbanas Criança	Adulto	Trabalhador comercial/industrial
Duração da exposição	anos	6	30	25
Expectativa de Vida	anos	72	72	72
Tempo médio para efeitos carcinogênicos	dias	26.280	26.280	26.280
Tempo médio para efeitos não carcinogênicos	dias	2.190	10.950	9.125
Massa corpórea	kg	15	70	70
Tempo de exposição para contato dérmico com água subterrânea	horas/dia	2	4	2
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes abertos	horas/dia	8	8	8
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes fechados	horas/dia	16	16	8
Frequência da exposição	dias/ano	350	350	290
Frequência de eventos para contato dérmico com o solo	eventos/dia	1	1	1
Taxa de ingestão de solo	mg/dia	200,0	100,0	50,0
Taxa de inalação diária em ambientes fechados	m <sup>3</sup> /hora	0,62	0,95	1,20
Taxa de inalação diária em ambientes abertos	m <sup>3</sup> /hora	0,78	1,20	1,20
Taxa de ingestão diária de água	L/dia	1,00	2,00	1,00
Fator de aderência do solo na pele	mg/cm <sup>2</sup> .evento	0,20	0,07	0,20
Área superficial da pele disponível para contato dérmico	cm <sup>2</sup>	4783	10367	2457

Fonte: Planilhas CETESB. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/planilhas-para-avaliacao-de-risco/8-planilhas>

### 3.2.4 SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco

O modelo matemático SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco foi concebido e desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Petrobras e a empresa de base tecnológica ESSS – *Engineering Simulation and Scientific Software*, motivado por estudos de campo e de laboratório, realizados pela UFSC nas áreas experimentais da Fazenda Ressacada (CORSEUIL *et al.*, 2006).

Inicialmente, o SCBR foi desenvolvido para avaliar os impactos na água subterrânea de eventuais derramamentos de combustíveis, incluindo o etanol. A partir de novas demandas da PETROBRAS o *software* evoluiu para uma importante ferramenta de apoio à tomada de decisão em ações preventivas e no gerenciamento ambiental de áreas contaminadas (CORSEUIL *et al.*, 2006).

Atualmente, além da simulação do fluxo e do transporte de contaminantes na zona saturada (2D horizontal) e não saturada (1D vertical), o SCBR permite a realização de planos de amostragens de solos e águas subterrâneas, avaliação de risco à saúde humana com a geração de mapas de risco, determinação de estimativas de cubagem de solo, simulação de técnicas de remediação de aquíferos e avaliação de cenários acidentais de forma preventiva. No caso de contaminações por derramamentos de petróleo e derivados, o SCBR pode considerar a interferência do etanol sobre a biodegradação e a solubilidade dos hidrocarbonetos de petróleo.

O SCBR permite que sejam acomodadas diversas metodologias de avaliação de risco à saúde humana. Atualmente (versão 3.1.rc.32), encontram-se implementada no SCBR as equações das Planilhas CETESB (2014b). A quantificação do risco pode ser realizada, no SCBR, a partir de concentrações medidas e simuladas dos contaminantes. As concentrações medidas permitem ao usuário inserir diretamente os valores de concentração obtidos em campo para os CQI nos meios considerados. Já o modo de concentrações simuladas utiliza, como concentrações de exposição, as maiores concentrações simuladas, para o período de exposição, em cada volume de controle.

O modelo de fluxo da água subterrânea implementado no SCBR é conhecida como equação de Boussinesq (CORSEUIL *et al.*, 2006). O modelo é bidimensional e válido para aquíferos não confinados. A equação de Boussinesq é obtida através da integração da equação tridimensional de fluxo sobre a dimensão vertical do aquífero, conforme Equação 16.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + (q_z + I) + F = S_Y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (16)$$

Onde  $K_X$  e  $K_Y$  são componentes principais do tensor de condutividade hidráulica, ao longo dos eixos de coordenadas  $x$  e  $y$ , respectivamente (m/s);  $q_z$  é o módulo da velocidade específica da água subterrânea, na direção de  $z$ , que atravessa a base do aquífero, representando o ganho ou perda de água através da interface com a camada confinante inferior (m/s);  $I$  é termo é a recarga através da superfície superior da zona saturada do meio (m/s);  $S_Y$  é o coeficiente de armazenamento do meio não saturado, (adimensional) e  $F$  representa o termo fonte (positivo) ou sumidouro (negativo) de água ( $m^3/m^2.s$ ).

No SCBR é assumido que os contaminantes dissolvidos na água subterrânea têm o seu comportamento influenciado pelos seguintes mecanismos de transporte e transformação: advecção, dispersão, sorção e a biodegradação. Os processos supracitados são simulados no SCBR a partir da solução da Equação 17.

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} = \frac{1}{R} \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(\rho C V_i)}{\partial x_i} \right] - \lambda \rho C + \frac{W \rho C}{n \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (17)$$

Onde  $\rho$  a densidade do aquífero ( $kg/m^3$ );  $C$  é a concentração do contaminante ( $kg/m^3$ );  $t$  é o tempo (s);  $R$  é o coeficiente de retardo (adimensional);  $D_{ij}$  é o tensor de dispersão hidrodinâmica ( $m^2/s$ );  $\lambda$  é o coeficiente de biodegradação (1/s);  $V$  é a velocidade da água subterrânea (m/s);  $W$  é o fluxo volumétrico ( $m^3/s$ );  $n$  é a porosidade efetiva; e  $x, y, z$  são os eixos coordenados.

### 3.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS

A análise comparativa entre os modelos de avaliação de risco à saúde humana, empregados neste trabalho foi realizada de maneira qualitativa e quantitativa (CHANG *et al.*, 2004; XAVIER e LOUREIRO, 2004; CHEN e MA, 2006; PINEDO *et al.*, 2014). Foram avaliados e comparados os aspectos de cada modelo, a saber: receptores, parâmetros de exposição dos receptores, vias de exposição e banco de dados físico-químicos e toxicológicos dos CQI.

A análise comparativa quantitativa foi realizada entre os modelos de avaliação de risco à saúde humana – RISC 4.0 v.4.01, RBCA

*ToolKit* v.2.6, Planilhas de Avaliação de Risco da CETESB atualização de maio de 2013 e SCBR v.3.1.rc32, a partir de dois cenários distintos de entrada de dados nos modelos de ARSH. Os cenários comparativos A e B foram descritos a partir de modelos conceituais de contaminação e de exposição teóricos.

O Cenário A considerou somente os dados de entrada dos parâmetros hidrogeológicos, índices físicos do solo e de caracterização da fonte de contaminação, nos compartimentos ambientais, como semelhantes nos três modelos. O Cenário A, é característico de projetos de avaliação de risco à saúde humana, realizados por empresas de consultoria, em âmbito nacional, onde os dados hidrogeológicos e de localização das fontes de contaminação são obtidos a partir de trabalhos de investigação ambiental na área de interesse.

O Cenário B, considerou como dados de entrada semelhantes nos três modelos além dos dados supracitados do Cenário A, as propriedades físico-químicas e toxicológicas dos compostos químicos de interesse e os parâmetros de exposição dos receptores. O cenário B tem como objetivo avaliar a influência dos bancos de dados físico-químicos e toxicológicos dos CQI e dos parâmetros de exposição dos receptores na quantificação do risco.

### **3.4 AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE EXPOSIÇÃO**

A avaliação comparativa da concentração da exposição foi realizada entre os modelos RISC 4 e SCBR. Foram simulados o transporte e a transformação de um contaminante no fluxo subterrâneo para a determinação da concentração de exposição de um receptor afastado do local de derramamento, i.e., fonte de contaminação.

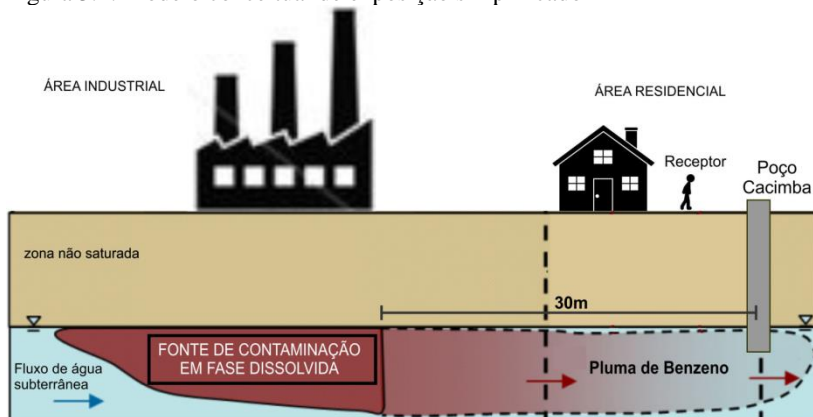
#### **3.4.1 Cenário de exposição**

A simulação do transporte e transformação de um contaminante no fluxo subterrâneo foi realizada a partir da elaboração de um cenário conservador de exposição com base nos estudos realizados por Schneider (2005) e Corseuil *et al.* (2006). O modelo simplificado, conforme ilustrado na Figura 3.1, constitui-se de uma fonte de contaminação como um derramamento fictício de gasolina diretamente na zona saturada. Os receptores potenciais foram assumidos como residentes, os quais apresentam em suas residências, poço para captação de água para consumo (poço cacimba) distante 30 m à jusante do



derramamento de gasolina. A distância fonte-ponto de exposição foi estabelecida com base no estudo realizado por Wiedemeier *et al.* (1999b), onde foi verificado, a partir da análise do comprimento de plumas de hidrocarbonetos de petróleo em fase dissolvida em 604 *sites* contaminados, que 37% das plumas alcançaram entre 30-60 m de comprimento máximo, ao longo do histórico de derramamento.

Figura 3.1. Modelo conceitual de exposição simplificado



Considerando que a gasolina apresenta em sua constituição dezenas de componentes químicos, nas simulações realizadas o Benzeno foi selecionado como o composto representativo da contaminação da água subterrânea por ser o composto de maior importância ambiental em derramamentos de gasolina devido a sua toxicidade e mobilidade (SCHNEIDER, 2005; CORSEUIL *et al.*, 2006). O tempo de meia-vida do Benzeno adotado para o derramamento foi de  $1,0 \text{ ano}^{-1}$ . O delineamento das plumas de Benzeno no SCBR foi definido pela concentração de  $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ , que corresponde ao padrão de potabilidade do Benzeno em água, conforme estabelecido pela Portaria 2.914 do Ministério da Saúde (2011). As dimensões estabelecidas para a fonte de Benzeno foram:  $1,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$  (comprimento na direção do fluxo subterrâneo  $\times$  largura  $\times$  profundidade de mistura) e o tempo de simulação (tempo de ocorrência do derramamento) foi de 10 anos.

O fluxo da água subterrânea foi simulado a partir da prescrição das características hidrogeológicas do cenário fictício. Foi atribuída porosidade efetiva (0,2) e não foram considerados efeitos de sorção (coeficiente de retardo = 1). Os coeficientes de dispersão longitudinal e transversal foram definidos como sendo igual a 0,1 e 0,01 m,

respectivamente. A condição de contorno utilizada para o fluxo (somente para as simulações no SCBR) foi a prescrição de cargas hidráulicas em pontos de análise - PAs, como no caso da obtenção de leituras de carga hidráulica em piezômetros. Ainda, de modo a verificar a influência da heterogeneidade do aquífero no transporte do contaminante, foram inferidas condutividades hidráulicas aos PAs.

O modelo unidimensional, RISC 4, possibilita em sua entrada de dados, somente um valor de gradiente hidráulico e condutividade hidráulica. Deste modo, o gradiente hidráulico ( $i$ ), utilizado como dado de entrada, foi quantificado a partir da Equação 18.

$$i = \frac{h_{P2} - h_{P1}}{L} \quad (18)$$

Onde  $h$  é a carga hidráulica (m) dos pontos selecionados P1 e P2 e  $L$  (m) é a distância entre os pontos de análise P1 e P2. Já a condutividade hidráulica foi estabelecida a partir da média harmônica das condutividades hidráulicas inferidas nos PAs na simulação do modelo SCBR.

### 3.4.2 Modelos de transporte e transformação de contaminantes utilizados

Os modelos de transporte e transformação de contaminantes no fluxo subterrâneo utilizados nas simulações foram: equação de Boussinesq (Equação 16) acrescida da equação de transporte e transformação do soluto dissolvido (Equação 17), no SCBR; e *Dissolved-Phase Transport Model* no RISC 4.

O modelo de transporte de contaminante em fase dissolvida do RISC 4, *Dissolved-Phase Transport Model* ou Fonte em fase dissolvida (Tabela 3.2) considera o fluxo subterrâneo unidimensional; dispersão nos eixos longitudinal, transversal e vertical (3-D), retardo (sorção) e degradação dos contaminantes. O modelo considera que a fonte está posicionada diretamente na zona saturada, portanto assume-se, que a massa do contaminante é instantaneamente dissolvida e que a concentração é homogênea ao longo do volume da fonte. A degradação é estabelecida a partir da meia vida do contaminante ( $\text{dia}^{-1}$ ) (SPENCE e WALDEN, 2001).

O SCBR utiliza a equação de Boussinesq acrescida da equação de transporte e transformação do soluto dissolvido para o transporte de

contaminantes em fase dissolvida (CORSEUIL *et al.*, 2006). O método de volumes finitos é utilizado na solução numérica da equação do escoamento para o caso bidimensional, assumindo a biodegradação como um decaimento de primeira ordem. Nos casos onde o etanol está presente, o modelo considera o efeito cosolvência e assume que não há biodegradação dos BTEX. Somente quando o etanol é exaurido do aquífero é iniciada a biodegradação dos hidrocarbonetos de petróleo (SCHNEIDER, 2005). O SCBR permite que o usuário escolha entre o modelo de fonte de equilíbrio (Lei de Raoult) ou a partir de concentrações do contaminante, medidas na fonte. Para estudo foi selecionado o modelo de fonte de concentrações medidas do contaminante.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS EM RELAÇÃO AOS RECEPTORES E VIAS DE EXPOSIÇÃO

A análise comparativa entre os modelos de avaliação de risco à saúde humana foi realizada de maneira qualitativa e quantitativa, verificando como os receptores, parâmetros de exposição dos receptores e vias de exposição são abordados em cada modelo.

#### 4.1.1 Receptores

Os modelos avaliados: RISC 4, RBCA *ToolKit* e Planilhas CETESB possuem, em seus banco dados *default*, os receptores em comum: Residentes crianças, Residentes adultos e Trabalhadores de obras civis (Tabelas Tabela 3.3, Tabela 3.5 e Tabela 3.7). O RISC 4, além dos receptores supracitados, também possibilita ao usuário (para análise determinística de ARSH), o receptor Transeuntes. O RBCA *ToolKit* possui como diferencial, Residentes adolescentes, Trabalhadores Comerciais, além do receptor “*User Defined*” o qual permite ao usuário a definição de todos os parâmetros de exposição necessários a quantificação do risco. As planilhas CETESB, dentre os modelos avaliados é o que possui o maior número de receptores *default* disponíveis ao usuário: 06. Possibilita a distinção do uso do solo de áreas residências em áreas residenciais urbanas e rurais, sendo assim, os receptores residenciais disponíveis ao usuário são: adultos em áreas urbanas, crianças em áreas urbanas, adultos em áreas rurais e crianças em áreas rurais.

#### 4.1.2 Parâmetros de exposição dos receptores

Os parâmetros de exposição são necessários a quantificação do fator de exposição (Equação 2), sendo desta forma, relevantes a quantificação do risco. Chang *et al.* (2004) demonstrou, a partir de análise de sensibilidade dos parâmetros necessários a quantificação do risco, que os parâmetros de exposição mais relevantes para o modelo RBCA *ToolKit* são: a massa corpórea e taxa de inalação (para as vias de exposição de inalação). A análise de sensibilidade realizada por Couto (2006), calculando-se as doses de ingresso e os valores de risco utilizando o modelo CSOIL, demonstrou que dentre os parâmetros de

exposição avaliados, a massa corpórea, a taxa de inalação e as taxas de ingestão de solo e água mostraram maior influência nos valores de risco final calculado. Pinedo *et al.*,(2014), verificaram, na determinação do índice de perigo para frações de Hidrocarbonetos Totais de Petróleo – TPH, que, para a via de exposição de ingestão de solo, a taxa de ingestão de solo é o parâmetro que mais influência na quantificação do índice de perigo.

O RISC 4 possibilita ao usuário escolher entre parâmetros de exposição com valores “típicos” ou “conservadores” (*Reasonable Maximum Exposure*) (Tabela 3.3). Os demais modelos avaliados adotam valores dos parâmetros de exposição semelhantes aos valores RME do RISC 4, portanto, conservadores (Tabelas Tabela 3.5 e Tabela 3.7). A planilha CETESB é a única, dentre os modelos avaliados que não possibilita ao usuário modificar os valores dos parâmetros de exposição dos receptores (CETESB, 2007).

A Tabela 4.1 apresenta alguns dos parâmetros de exposição *default*, dos modelos avaliados, utilizados na quantificação do risco.

Dos parâmetros de exposição que demonstraram maior influência na quantificação do risco (CHANG *et al.*,2004; COUTO, 2006), a massa corpórea e a taxa de ingestão diária de água apresentam valores semelhantes para todos os receptores em todos os modelos avaliados (Tabela 4.1).

Para a taxa de ingestão de solo, os modelos avaliados, também apresentam valores semelhantes (Tabela 4.1), à exceção do receptor trabalhador de obras civis, para o qual, a Planilha CETESB, apresenta um valor menos conservador ( $200 \text{ mg.dia}^{-1}$ ) do que RISC 4 e RBCA *ToolKit* ( $100 \text{ mg.dia}^{-1}$ ).

Os valores *default* de taxa de inalação de vapores em ambientes abertos e fechados demonstram que, para os receptores trabalhadores de obras civis e residentes crianças as Planilhas CETESB apresentam valores mais conservadores de taxa de inalação do que o RISC 4. Para receptores residentes adultos, o RISC 4 apresenta valores mais conservadores ( $0,83 \text{ m}^3.\text{hora}^{-1}$ ) tanto para inalação de vapores em ambientes abertos quanto para ambientes fechados (Tabela 4.1).

O SCBR tem uma abordagem flexível, permitindo que sejam acomodadas diversas metodologias de avaliação de risco à saúde humana. Em virtude de atualmente (versão 3.1.rc32) estar incorporado no seu código a metodologia das Planilhas CETESB (2014b), os parâmetros de exposição estabelecidos, são análogos para ambos os softwares. Entretanto diferentemente das Planilhas CETESB, o SCBR permite a customização, pelo usuário, dos valores destes parâmetros.

Tabela 4.1. Compilação dos parâmetros de exposição *default* dos modelos avaliados.

Parâmetros de exposição		Trabalhadores de obras civis			Residentes crianças			Residentes adultos		
		RISC 4*	Planilhas CETESB	RBCA Toolkit	RISC 4*	Planilhas CETESB	RBCA Toolkit	RISC 4*	Planilhas CETESB	RBCA Toolkit
Duração da exposição	anos	25	2	1	6	6	6	30	30	30
Expectativa de vida	anos	70	72	70	70	72	70	70	72	70
Massa corpórea	kg	70	70	70	15	15	15	70	70	70
Frequência da exposição	dias/ano	250	290	180	350	350	350	350	350	350
Taxa de ingestão de solo	mg/dia	100	200	100	200	200	200	100	100	100
Taxa de inalação diária de vapores em ambientes fechados	m3/hora	2,5	1,2	-	0,63	0,62	-	0,83	0,95	-
Taxa de inalação diária de vapores em ambientes abertos	m3/hora	2,5	1,2	-	0,83	0,78	-	0,83	1,2	-
Taxa de ingestão diária de água	L/dia	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Fator de aderência do solo na pele por evento de contato dérmico	mg/cm <sup>2</sup>	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	0,07	0,5
Área superficial da pele disponível para contato dérmico	cm <sup>2</sup>	13.110	2.457	3.160	4.004	4.783	2.023	5.750	10.367	3.160

Obs.: (\*) Valores do parâmetros de exposição Reasonable Maximum Exposure; (-) Parâmetro de exposição não utilizado, pelo RBCA Toolkit, na quantificação do risco para as vias de exposição de inalação.

### 4.1.3 Vias de exposição

A importância relativa de cada uma das vias de exposição, na quantificação do risco, está relacionada às características físicas, químicas e toxicológicas da substância envolvida como também às propriedades do subsolo e ao comportamento dessa substância no subsolo. O entendimento desses fatores permite prever ou mesmo definir o compartimento alvo da substância, identificando a via dominante de exposição ao ser humano (CETESB, 2001). As vias de exposições disponíveis ao usuário, por modelo, para a quantificação do risco nos modelos avaliados são apresentadas na Tabela 4.2.

O software RISC 4 possibilita ao usuário escolher entre 16 vias de exposição (SPENCE e WALDEN, 2001). Possui como diferencial, as vias de exposição relacionadas ao uso da água subterrânea para irrigação (ingestão, inalação e contato dérmico), além da inalação de vapores durante o banho a partir de água subterrânea contaminada (Tabela 4.2).

Uma limitação do modelo RISC 4, é permitir a seleção de somente uma via de exposição de inalação por projeto (SPENCE e WALDEN, 2001). Desta forma se o usuário deseja, por exemplo, quantificar o risco e/ou as concentrações máximas aceitáveis para as vias de exposição: inalação de vapores em ambientes abertos a partir de concentrações de contaminantes em água subterrânea, inalação de vapores em ambientes fechados a partir de concentrações de contaminantes no solo e inalação de vapores em ambientes fechados a partir de concentrações de contaminantes em água subterrânea, será necessário ao usuário criar 03 projetos diferentes no RISC 4.

As Planilhas CETESB, dentre os modelos avaliados é o que possui a maior quantidade de vias de exposição disponíveis ao usuário: 16 (Tabela 4.2). Possui como diferencial, as vias de exposição de ingestão e contato dérmico a partir de sedimentos contaminados e inalação de vapores a partir de atividades de recreação em água superficial contaminada por água subterrânea. Entretanto, as vias de exposição em questão, somente estão disponíveis para a quantificação do risco e CMA para receptores adultos e crianças em áreas urbanas e rurais e trabalhadores comerciais/industriais afastados da fonte de contaminação “receptor fora da fonte” (CETESB, 2014b). Para os receptores Trabalhadores de obras civis, além das vias supracitadas, também não é possível a quantificação do risco para a ingestão de vegetais.

O modelo RBCA Toolkit possibilita a quantificação do risco a partir de 13 de vias de exposição (CONNOR *et al.*, 2007), menor número de vias possíveis, dentre os modelos avaliados. Possui como diferencial as vias de exposição de contato dérmico e ingestão de água superficial a partir da natação e ingestão de pescados.

A limitação do modelo RBCA *ToolKit* é de não possibilitar, para o receptor trabalhador, as vias de exposição: inalação de vapores em ambientes fechados, provenientes do solo subsuperficial e da água subterrânea e ingestão de água subterrânea (CONNOR *et al.*, 2007).



Tabela 4.2. Compilação das vias de exposição disponíveis nos modelos avaliados.

Meio Contaminado	Via de exposição	RISC 4	Planilhas CETESB	RBCA ToolKit
Solo superficial	Ingestão	X	X	X
	Contato dérmico	X	X	X
	Ingestão de vegetais	X	X	X
Água superficial	Ingestão	X	X	
	Contato dérmico	X	X	
	Contato dérmico e ingestão a partir da natação			X
	Ingestão de pescados			X
Água subterrânea	Ingestão	X	X	X
	Ingestão partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado		X	X
	Contato dérmico	X	X	
	Inalação (chuveiro)	X		
	Ingestão (uso d'água para irrigação)	X		
	Inalação de compostos voláteis (uso d'água para irrigação)	X		
	Contato dérmico (uso d'água para irrigação)	X		
	Ingestão de vegetais	X		
Ar	Inalação de vapores ou partículas a partir do solo superficial contaminado		X	X
	Inalação de vapores a partir de atividades de recreação em água superficial contaminada por água subterrânea		X	
	Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea contaminada	X	X	X
	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea contaminada	X	X	X
	Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial contaminado	X	X	X
	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial contaminado	X	X	X
	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado			X
Sedimento	Ingestão		X	
	Contato dérmico		X	

Obs.: (X) Via de exposição possível.

## 4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A análise comparativa quantitativa foi realizada por meio de simulações matemáticas de dois cenários com os modelos de avaliação de risco à saúde humana – RISC 4, RCBA *Toolkit*, e Planilhas CETESB.

Os cenários comparativos A e B, criados para as simulações, foram descritos a partir do modelo conceitual de contaminação e do modelo conceitual de exposição. O Cenário A considerou somente os dados de entrada dos parâmetros hidrogeológicos, índices físicos do solo e de caracterização da fonte de contaminação, nos compartimentos ambientais, como semelhantes nos três modelos. O Cenário B considerou como dados de entrada semelhantes nos três modelos, além dos dados supracitados do Cenário A, as propriedades físico-químicas e toxicológicas dos compostos químicos de interesse e os parâmetros de exposição dos receptores. Os riscos alvos, carcinogênico e não carcinogênico, considerados para a quantificação das concentrações máximas aceitáveis em ambos os cenários, foram de  $1 \times 10^{-5}$  e 1,0, respectivamente.

### 4.2.1 Modelo conceitual de contaminação

A quantificação do risco e da CMA foi realizada, em ambos os cenários, para o composto químico Benzeno e a substância metálica Chumbo. Ambos os compostos químicos são usualmente encontrados em áreas industriais em concentrações acima de valores estabelecidos por órgão ambientais e, portanto, representativos em um cenário de contaminação (CETESB, 2001).

O Benzeno, constituinte do grupo dos hidrocarbonetos aromáticos BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e os isômeros *orto*, *meta* e *para*-Xilenos), é um composto tóxico, carcinogênico e que possui alta solubilidade relativa em água (em comparação aos outros compostos do grupo BTEX) sendo, portanto, facilmente disperso no lençol freático (USEPA, 2009). O Benzeno tem uma mobilidade elevada no solo, lixiviando facilmente para águas subterrâneas. No ar é transformado por foto oxidação, quando em água é biodegradável em condições aeróbias e pode ser relativamente persistente nas água subterrâneas.

A substância metálica Chumbo pode afetar o sistema nervoso, tanto em adultos como em crianças. A exposição aguda pode causar

inflamação gastrointestinal, vômitos e diarreias. Na exposição prolongada são observados efeitos renais, cardiovasculares, neurológicos e nos músculos e ossos, entre outros. É um composto cumulativo provocando um envenenamento crônico denominado saturnismo. As principais vias de exposição da população geral ao chumbo são oral e inalatória. Mais de 80% do chumbo que ingressa diariamente no organismo é oriundo da ingestão de alimentos, sujeiras e poeiras contendo o metal (USEPA, 2009).

As concentrações estabelecidas para os CQI Tabela 4.3, considerados na elaboração dos cenários comparativos, tiveram como base os dispostos na Resolução CONAMA nº 420 (2009). Conforme disposto no Anexo II – Lista de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas (CONAMA, 2009), os valores orientadores de investigação dos CQI Benzeno e do Chumbo, em água subterrânea e no solo (uso do solo industrial para a área de estudo), são respectivamente:  $5 \text{ ug.L}^{-1}$  e  $0,15 \text{ mg.kg}^{-1}$  para o Benzeno; e  $10 \text{ ug.L}^{-1}$  e  $900 \text{ mg.kg}^{-1}$  para o Chumbo. Segundo CONAMA (2009), caso sejam verificadas concentrações de compostos e substâncias químicas, acima dos valores de investigação, a área de interesse é declarada como Área Contaminada sob Investigação - AI, sendo cabíveis ações de investigação detalhada na área e avaliação de risco à saúde humana.

O compartimento ambiental solo, de maneira a contemplar as diferentes disposições da fonte de contaminação, nas vias de exposição consideradas, no modelo conceitual de exposição deste trabalho, foi distinto em camadas de solos superficiais (profundidades entre nível do terreno e 1,0 m abaixo do nível do terreno) e subsuperficiais (profundidades superiores a 1,0 m abaixo do nível do terreno) (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Concentrações estabelecidas para os compostos químicos de interesse.

Compartimento ambiental	Composto químico de interesse	Unidade	Concentração
Água subterrânea	Benzeno	µg/L	15
	Chumbo	µg/L	50
Solo superficial	Benzeno	mg/L	10
	Chumbo	mg/L	1.000
Solo subsuperficial	Benzeno	mg/L	10
	Chumbo	mg/L	1.000

#### 4.2.2 Modelo conceitual de exposição

Na elaboração do modelo conceitual de exposição foram considerados os receptores e vias de exposição comuns aos três modelos avaliados, possibilitando, deste modo, a realização da análise comparativa quantitativa do risco carcinogênico e não carcinogênico (índice de perigo) e das concentrações máximas aceitáveis.

##### 4.2.2.1 Receptores e parâmetros de exposição

A partir do exposto no Item 4.2.2, os receptores avaliados neste trabalho e considerados na análise comparativa quantitativa foram:

- Crianças residentes em áreas urbanas;
- Adultos residentes em áreas urbanas;
- Trabalhadores de obras civis e de escavação; e
- Trabalhadores de comércios e indústrias.

O receptor denominado “*Worker*” pelo modelo RISC 4 e apresentado na Tabela 3.3 como Trabalhador, foi considerado para as simulações, em virtude dos parâmetros de exposição apresentados (Tabela 3.3), como trabalhador de obras civis e de escavação. Para o modelo RBCA *ToolKit*, o receptor denominado “*Comercial*” e apresentado na Tabela 3.5 como Trabalhador comercial foi considerado, nas simulações, como trabalhador de comércios e indústrias. De maneira conservadora, a quantificação do risco e das concentrações máximas

aceitáveis, foi realizada somente para receptores *on-site* e posicionados acima da fonte de contaminação.

Para os receptores do modelo RISC 4, foram utilizados os parâmetros de exposição conservadores (RME - *Reasonable Maximum Exposure*) (Tabela 3.3). Os parâmetros de exposição considerados, para os receptores dos modelos RBCA *ToolKit* e Planilhas CETESB, são os apresentados nas Tabela 3.5 e Tabela 3.7, respectivamente.

#### 4.2.2.2 Vias de exposição

As vias de exposição, consideradas nas simulações, para quantificação do risco e das CMA, foram:

- Ingestão de água subterrânea impactada;
- Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada;
- Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada;
- Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado;
- Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado;
- Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado;
- Ingestão acidental de solo superficial impactado; e
- Contato dérmico com solo superficial impactado.

Nas vias de exposição de inalação de vapores em ambientes abertos ou fechados a partir do solo subsuperficial impactado, o modelo utilizado para os processos de volatilização de vapores a partir de fontes de contaminação em solo subsuperficial, foram: Johnson e Ettinger nos softwares RISC 4, Planilhas CETESB e RBCA *ToolKit*.

Para as vias de exposição de inalação de vapores em ambientes abertos ou fechados a partir da água subterrânea impactada os modelos utilizados, para os processos de volatilização de vapores, foram: Emissão de vapores da água subterrânea para o *software* RISC 4 (Tabela 3.2) e Johnson e Ettinger associado as equações da norma ASTM E-1739-95 (2010) para o *software* RBCA *ToolKit*.

Para o processo de lixiviação de contaminantes presentes no solo subsuperficial até o lençol freático, necessário à via de exposição:

ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial, foram utilizadas, no modelo *RBCA ToolKit*, as equações dispostas na norma ASTM E-1739-95 (2010).

O *software* RISC 4 não apresenta ao usuário, na sua saída de resultados, as CMA por via de exposição. As concentrações máximas aceitáveis para compostos carcinogênicos e não carcinogênicos do RISC 4, apresentadas neste trabalho, referem-se ao valor mais restritivo dentre as CMA calculadas para todas as vias de exposição do compartimento ambiental em questão (solo superficial, solo subsuperficial ou água subterrânea).

Na Figura 4.1 são apresentadas as vias de exposição, do modelo conceitual de exposição, contempladas neste trabalho.

Figura 4.1. Representação esquemática das vias de exposição consideradas no modelo conceitual de exposição.

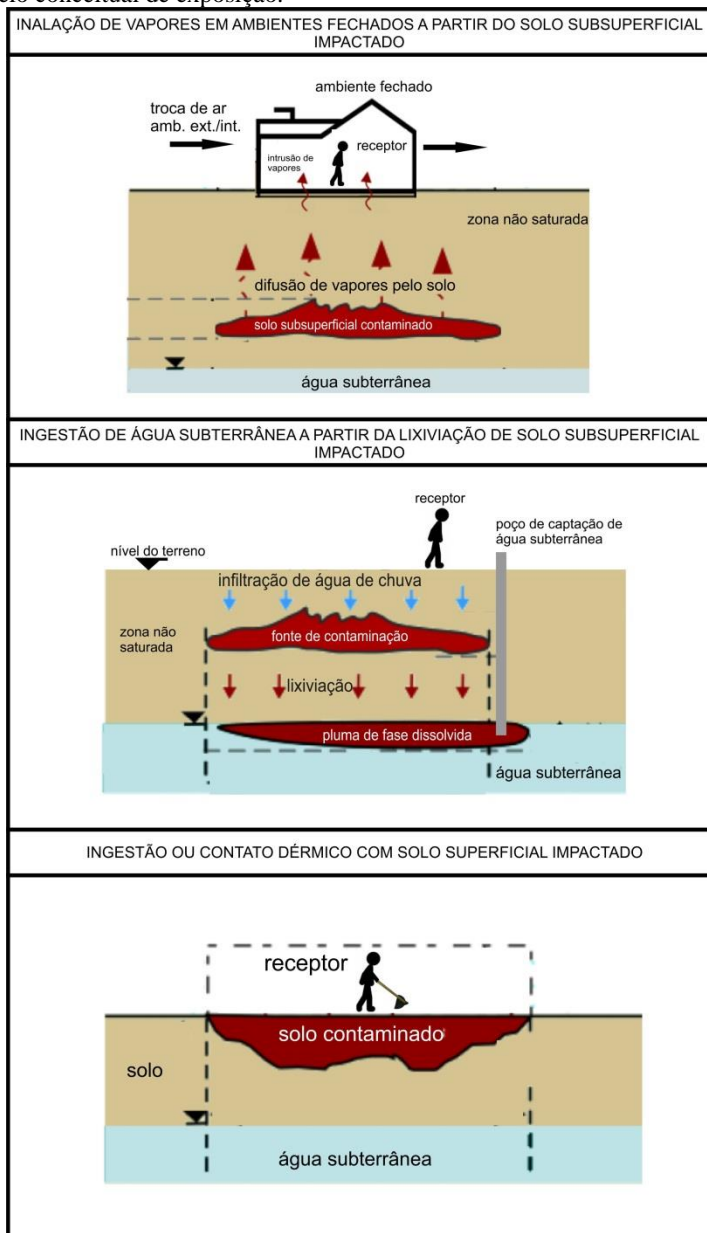


Figura 4.1. Representação esquemática das vias de exposição consideradas no modelo conceitual de exposição (continuação).

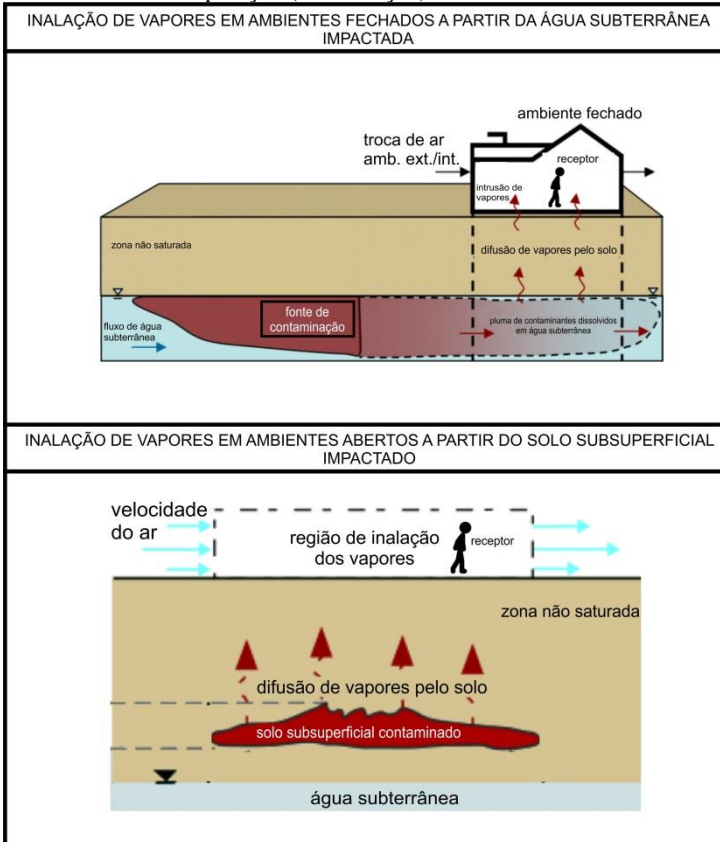
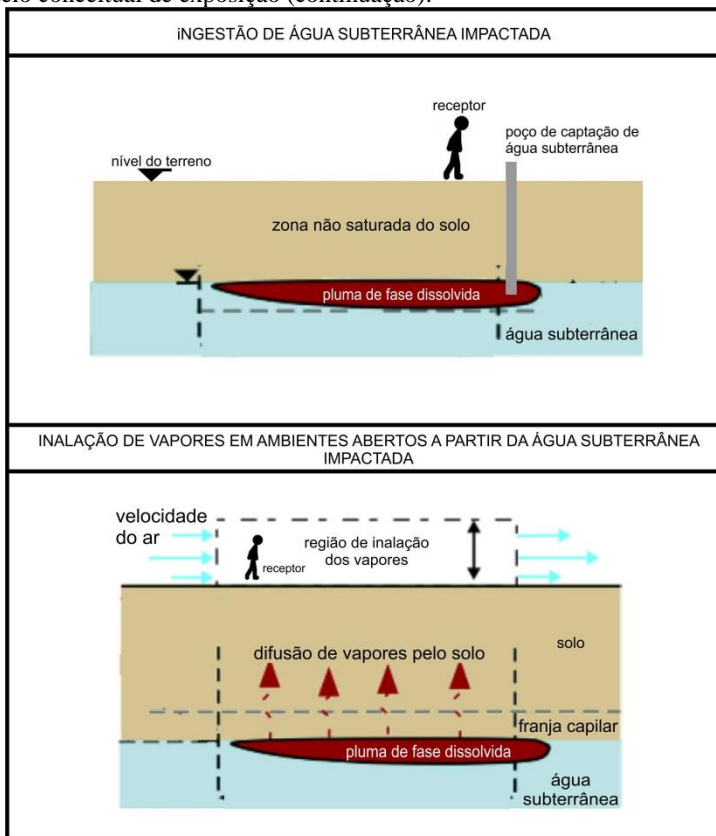




Figura 4.1. Representação esquemática das vias de exposição consideradas no modelo conceitual de exposição (continuação).



### 4.2.3 Quantificação da exposição no Cenário A

O primeiro cenário comparativo (Cenário A) considerou os dados de entrada dos parâmetros hidrogeológicos, índices físicos do solo e de caracterização da fonte de contaminação, nos compartimentos ambientais, como semelhantes nos três modelos. Os parâmetros de exposição considerados, para os receptores, foram os expostos nas Tabela 3.3, Tabela 3.5 e Tabela 3.7. Os parâmetros físico-químicos e toxicológicos considerados, dos CQI avaliados, foram os valores *default* dos bancos de dados dos modelos RISC 4, Planilhas CETESB e RBCA *ToolKit* (Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6). Demais dados de entrada, necessários a quantificação do risco e das CMA pelos modelos, foram mantidos os valores *default*.

Os dados de entrada hidrogeológicos, dos índices físicos do solo e de caracterização da fonte de contaminação, inseridos nos três modelos avaliados, são apresentados na Tabela 4.7. Os valores selecionados, para os parâmetros hidrogeológicos e da fonte de contaminação, tem como base os valores *default* da Planilha CETESB (2014b).

O Cenário A, é característico de projetos de avaliação de risco à saúde humana, realizados por empresas de consultoria, em âmbito nacional. Os poucos dados hidrogeológicos e de localização das fontes de contaminação, são obtidos a partir de trabalhos de investigação ambiental na área de interesse. A saber, instalação de poços de monitoramento, campanhas de medição de nível d'água, coleta de amostras de água e solo; sondagens de investigação de solo; ensaios físico-químicos de amostras de solo e ensaios analíticos de amostras de solo e água subterrânea.

Cabe frisar, que o modelo RISC 4, não possui, em seu banco de dados de entrada *default*, o receptor trabalhador de comércio e ou industriais. Deste modo, o mesmo não foi considerado para a análise comparativa quantitativa do Cenário A.

Tabela 4.4. Valores *default* dos parâmetros toxicológicos dos bancos de dados dos modelos.

CQI	Modelo	RfD <sub>O</sub>	RfD <sub>I</sub>	RfD <sub>D</sub>	Sf <sub>O</sub>	Sf <sub>I</sub>	Sf <sub>D</sub>	ABS <sub>GI</sub>	ABS <sub>D</sub>
		(mg.kg <sup>-1</sup> .dia <sup>-1</sup> )	(mg.kg <sup>-1</sup> .dia <sup>-1</sup> )	(mg.kg <sup>-1</sup> .dia <sup>-1</sup> )	(mg/kg-day) <sup>-1</sup>	(mg/kg-day) <sup>-1</sup>	(mg/kg-day) <sup>-1</sup>	(%)	(-)
Benzeno	<b>Planilhas CETESB</b>	4,00E-03	8,57E-03	4,00E-03	5,50E-02	2,73E-02	5,50E-02	100	-
	<b>RISC 4</b>	-	-	-	2,90E-02	2,70E-02	2,90E-02	100	0,01 (solo) 1,00 (água)
	<b>RBCA ToolKit</b>	4,00E-03	8,00E-02	4,00E-03	1,50E-02	7,70E-05	1,50E-02	97	0
CQI		RfD <sub>O</sub>	RfD <sub>I</sub>	RfD <sub>D</sub>	Sf <sub>O</sub>	Sf <sub>I</sub>	Sf <sub>D</sub>	ABS <sub>GI</sub>	ABS <sub>D</sub>
		(mg.kg <sup>-1</sup> .dia <sup>-1</sup> )	(mg.kg <sup>-1</sup> .dia <sup>-1</sup> )	(mg.kg <sup>-1</sup> .dia <sup>-1</sup> )	(mg/kg-day) <sup>-1</sup>	(mg/kg-day) <sup>-1</sup>	(mg/kg-day) <sup>-1</sup>	(%)	(-)
Chumbo	<b>Planilhas CETESB</b>	3,60E-03	-	3,60E-03	-	-	-	100	-
	<b>RISC 4</b>	3,60E-03	-	3,60E-03	-	-	-	100	0,01 (solo) 1,00 (água)
	<b>RBCA ToolKit</b>	-	-	-	-	-	-	15	-

Obs.: (-) Parâmetro não disponível para o CQI em questão. "O" vias de exposição de ingestão; "I" vias de exposição de inalação; "D" vias de exposição de contato dérmico; ABS<sub>GI</sub> Fator de absorção gastrointestinal; e ABS<sub>D</sub> Fator de absorção dérmica.

Tabela 4.5. Valores *default* dos parâmetros físico-químicos do Benzeno nos bancos de dados dos modelos.

CQI	Modelo	Peso molecular (g/mol)	Cte. da Lei de Henry (-)	Densidade (g/mL)	Koc (L/kg)	Solubilidade em água (mg/L)	Difusividade no ar (cm <sup>2</sup> /s)
Benzeno	<b>Planilhas CETESB</b>	78,11	0,23	0,88	61,70	1.790	8,95E-02
	<b>RISC 4</b>	78,00	0,23	0,88	59,00	1.750	8,80E-02
	<b>RBCA ToolKit</b>	78,11	0,23	N.I.	66,10	1.770	8,80E-02

Tabela 4.5. Valores *default* dos parâmetros físico-químicos do Benzeno nos bancos de dados dos modelos (continuação).

CQI	Modelo	Difusividade na água (cm <sup>2</sup> /s)	Coef. distribuição (Kd) (L/kg)	Tempo de meia- vida (ano)	Cte. perm. dérmica (cm/hora)	log Kow (-)	Pressão de vapor (mmHg)
Benzeno	<b>Planilhas CETESB</b>	1,03E-05	0,19	1,97	1,49E-02	2,13	96,66
	<b>RISC 4</b>	9,80E-06	-	N.I.	2,10E-02	2,10	95,00
	<b>RBCA ToolKit</b>	9,80E-06	-	720,00	2,10E-02	1,99	95,00

Obs.: (-) Parâmetro não disponível para o CQI em questão; (N.I.) Parâmetro não informado.

Tabela 4.6. Valores default dos parâmetros físico-químicos do Chumbo no bancos de dados dos modelos.

CQI	Modelo	Peso molecular (g/mol)	Cte. da Lei de Henry (-)	Densidade (g/mL)	Koc (L/kg)	Solubilidade em água (mg/L)	Difusividade no ar (cm <sup>2</sup> /s)
Chumbo	<b>Planilhas CETESB</b>	207,20	-	11,30	-	-	-
	<b>RISC 4</b>	0	0	-	-	-	-
	<b>RBCA ToolKit</b>	207,2	0	N.I.	-	0	0

Tabela 4.6. Valores default dos parâmetros físico-químicos do Chumbo no bancos de dados dos modelos (continuação).

CQI	Modelo	Difusividade na água (cm <sup>2</sup> /s)	Coef. distribuição (Kd) (L/kg)	Tempo de meia-vida (ano)	Cte. perm. dérmica (cm/hora)	log Kow (-)	Pressão de vapor (mmHg)
Chumbo	<b>Planilhas CETESB</b>	-	2.131,00	-	1,00E-04	-	-
	<b>RISC 4</b>	-	9,90	N.I.	0	-	0
	<b>RBCA ToolKit</b>	0	10,00	-	-	0,73	0

Obs.: (-) Parâmetro não disponível para o CQI em questão; (N.I.) Parâmetro não informado.

Tabela 4.7. Dados de entrada do ambiente inferidos para o Cenário A.

Parâmetros		
Espessura do solo subsuperficial impactado	cm	345,00
Profundidade do nível d'água	cm	450,00
Espessura do solo superficial impactado	cm	100,00
Espessura da fonte na água subterrânea	cm	200,00
Porosidade total	-	0,46
Porosidade efetiva	cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>	0,12
Densidade do dolo	g.cm <sup>-3</sup>	1,30
Fração de carbono orgânico no solo	(g-C).(g-solo) <sup>-1</sup>	0,003
Condutividade hidráulica	cm.dia <sup>-1</sup>	11,23

#### 4.2.4 Resultados das simulações do Cenário A

O Apêndice A “Planilhas dos resultados das simulações dos cenários” apresenta os resultados de quantificação do risco carcinogênico, índice de perigo e concentrações máximas aceitáveis no Cenário A com todos os modelos avaliados, discretizados por composto químico de interesse e por receptor.

##### 4.2.4.1 Risco carcinogênico ao Benzeno no Cenário A

Os resultados da quantificação do risco carcinogênico ao Benzeno, no Cenário A, por receptor, via de exposição e modelo avaliado, são apresentados na Tabela 4.8. Também são apresentados os resultados do somatório dos riscos carcinogênicos das vias de exposição consideradas, também chamado de Risco Total, conforme Equação 5 (USEPA, 1989). O Risco Total é apresentado por modelo de ARSH avaliado. Analogamente, são apresentados os pesos dos riscos de cada uma das vias de exposição avaliadas, no Risco total. O peso ou contribuição das vias, foi calculado a partir da Equação 19.

$$Peso_i = \frac{Rc_i}{\sum Rc} \times 100\% \quad (19)$$

Onde  $Peso_i$  representa a contribuição da via de exposição  $i$  no risco total (%);  $Rc_i$  o risco para a via de exposição  $i$  (adimensional) (Equação 3); e  $\Sigma Rc$  o risco total (-) (Equação 5).

O risco alvo carcinogênico estabelecido ( $10^{-5}$ ) foi ultrapassado nas seguintes vias de exposição: inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial contaminado (RISC 4), inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial (RBCA *ToolKit*, RISC 4 e Planilhas CETESB) e ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado (RBCA *ToolKit* e Planilhas CETESB).

A via de exposição que apresenta o maior valor de risco carcinogênico ao Benzeno, entre os modelos RBCA *Toolkit* e Planilhas CETESB e todos os receptores avaliados é a ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado (Tabela 4.8), análogo aos resultados obtidos no estudo realizado por Pinedo *et al.*, (2014). Por conseguinte, é a via de exposição que mais contribui para o Risco total, 99,12% para Residentes Crianças (RBCA *ToolKit*) a 87,73% para Trabalhadores de Obras Civis (Planilhas CETESB) (Tabela 4.8). Conforme apresentado no Anexo, o Fator de Lixiviação (LF), calculado pelo modelo RBCA *ToolKit*, apresenta valor maior que os Fatores de Volatilização (VF), o que justificaria a elevada preponderância da via de exposição ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado sobre as demais vias.

Os fatores VF e LF - calculados a partir dos modelos de transporte e transformação de contaminantes – são necessários a quantificação do risco para as vias de inalação de vapores e lixiviação, respectivamente. O modelo de transporte e transformação de contaminantes utilizado na determinação do Fator de Lixiviação no RBCA *ToolKit*, foi o descrito na norma ASTM E-1739-95 (ASTM, 2010). Cabe salientar que o modelo em questão não considera processos de atenuação dos contaminantes (CONNOR *et al.*, 2007), o que também justificaria os elevados valores de LF e consequentemente o alto risco para a via em questão (Tabela 4.8).

As vias de exposição de inalação de vapores em ambientes fechados e ingestão de água subterrânea são a segunda e terceira vias de exposição, respectivamente, que mais contribuem para o risco total, nos modelos RBCA *Toolkit* e Planilhas CETESB (Tabela 4.8). Segundo estudo realizado por Chen e Ma (2006) ambas as vias apresentaram contribuições significativas no risco total quantificado. Neste estudo a

ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial não foi avaliada.

O modelo RISC 4, o qual não possui a via de exposição ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado (SPENCE e WALDEN, 2001), apresenta, como vias de exposição que mais contribuem para o Risco Total: inalação de vapores em ambientes abertos e fechados a partir do solo subsuperficial contaminado. Para os receptores Residentes Adultos, a via de exposição, Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial, apresenta um peso de 91,65%, no risco total carcinogênico ao Benzeno, enquanto que para a Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial, 7,36% (Tabela 4.8).

Para os demais receptores possíveis ao modelo RISC 4 (Residentes Crianças e Trabalhadores de Obras Civas), a via de exposição inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial apresenta um peso maior: 50,44% (Residentes Crianças) e 69,21% (Trabalhadores de Obras Civas), do que a via Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial 49,21% (Residentes Crianças) e 29,58% (Trabalhadores de Obras Civas) (Tabela 4.8).

A via de exposição, inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial apresenta um peso maior que a ingestão de água subterrânea, para o modelo RISC 4. Já para os modelos RBCA *ToolKit* e Planilha CETESB observa-se que, de modo geral, a ingestão de água subterrânea apresenta um peso maior (Tabela 4.8). Conforme apresentado na Tabela 4.1, o valor da taxa de inalação diária de vapores em ambientes abertos do modelo RISC 4 é maior que o dos demais modelos, justificando os resultados observados. Associado a isto, ainda há de se levar em consideração o significativo peso das taxas de ingestão e inalação na quantificação do risco total (CHANG *et al.*, 2004; COUTO, 2006)

A via de exposição contato dérmico com o solo superficial não apresentou resultados para nenhum receptor dos modelos Planilhas CETESB e RBCA *ToolKit* (Tabela 4.8 e Tabela 4.9). Os bancos de dados dos parâmetros físico-químicos e toxicológicos *default* das Planilhas CETESB e do RBCA *ToolKit*, não contemplam, para os compostos Benzeno e Chumbo, o parâmetro Fator de absorção dérmica ( $ABS_D$ ), necessário à quantificação do Risco, Índice de perigo e CMA da via de exposição em questão (Tabela 4.4).



Tabela 4.8. Risco carcinogênico ao Benzeno para o Cenário A.

Vias de exposição			Ingestão de água subterrânea contaminada	Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea	Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial	Ingestão acidental de solo superficial	Contato dérmico com solo superficial	Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial	Risco total
Residentes Adultos	RBCA <i>ToolKit</i>	Risco (-)	2,60E-06	5,80E-09	4,90E-08	4,30E-07	9,60E-05	8,80E-08	-	4,90E-03	5,00E-03
		Peso (%)	0,05	0,00	0,00	0,00	1,92	0,00	-	98,02	100
	RISC 4	Risco (-)	5,10E-06	8,30E-12	6,50E-08	4,50E-05	5,60E-04	1,70E-07	2,00E-07	N.C	6,11E-04
		Peso (%)	0,83	0,00	0,01	7,36	91,65	0,03	0,03	-	100
	Planilhas CETESB	Risco (-)	9,42E-06	4,36E-09	5,45E-07	1,60E-06	3,23E-04	3,14E-07	-	1,48E-02	1,51E-02
		Peso (%)	0,06	0,00	0,00	0,01	2,13	0,00	-	97,79	100
Residentes Crianças	RBCA <i>ToolKit</i>	Risco (-)	1,20E-06	1,20E-09	9,80E-09	8,60E-08	1,90E-05	1,60E-07	-	2,30E-03	2,32E-03
		Peso (%)	0,05	0,00	0,00	0,00	0,82	0,01	-	99,12	100
	RISC 4	Risco (-)	2,40E-06	7,40E-11	4,60E-08	4,10E-04	4,00E-04	3,20E-07	1,30E-07	N.C	8,13E-04
		Peso (%)	0,30	0,00	0,01	50,44	49,21	0,04	0,02	-	100
	Planilhas CETESB	Risco (-)	4,39E-06	2,65E-09	3,32E-07	9,68E-07	1,97E-04	5,86E-07	-	6,92E-03	7,12E-03
		Peso (%)	0,06	0,00	0,00	0,01	2,77	0,01	-	97,15	100

Tabela 4.8. Risco carcinogênico ao Benzeno para o Cenário A (continuação).

Vias de exposição		Ingestão de água subterrânea contaminada	Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea	Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial	Ingestão acidental de solo superficial	Contato dérmico com solo superficial	Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial	Risco total
<b>RBCA ToolKit</b>	Risco (-)	2,30E-08	9,90E-11	8,40E-10	7,30E-09	1,60E-06	1,50E-09	-	4,20E-05	4,36E-05
	Peso (%)	0,05	0,00	0,00	0,02	3,67	0,00	-	96,26	100
<b>Trab. Obras Cívicas</b>	Risco (-)	1,50E-06	4,80E-11	1,30E-08	2,60E-04	1,10E-04	1,00E-07	2,70E-07	N.C.	3,72E-04
	Peso (%)	0,40	0,00	0,00	69,91	29,58	0,03	0,07	-	100
<b>Planilhas CETESB</b>	Risco (-)	2,60E-07	2,41E-10	1,60E-08	1,32E-06	5,57E-05	3,47E-08	-	4,10E-04	4,67E-04
	Peso (%)	0,06	0,00	0,00	0,28	11,92	0,01	-	87,73	100
<b>RBCA ToolKit</b>	Risco (-)	7,90E-07	3,40E-09	2,90E-08	2,60E-07	5,70E-05	2,60E-08	-	1,50E-03	1,56E-03
	Peso (%)	0,05	0,00	0,00	0,02	3,66	0,00	-	96,27	100
<b>Trab. Comerciais Industriais</b>	Risco (-)	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
	Peso (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	Risco (-)	3,25E-06	3,01E-09	1,66E-07	1,32E-06	1,41E-04	1,08E-07	-	5,12E-03	5,27E-03
	Peso (%)	0,06	0,00	0,00	0,03	2,68	0,00	-	97,23	100

Obs.: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em **vermelho** indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido ( $10^{-5}$ ).

Os riscos carcinogênicos totais ao Benzeno, por receptor e modelo avaliado no Cenário A, são apresentados na Figura 4.2.

O risco alvo carcinogênico estabelecido ( $10^{-5}$ ) foi ultrapassado para todos os receptores e modelos avaliados (Figura 4.2). Conforme exposto na Tabela 4.8, as vias de exposição com maior peso no Risco Total (Inalação de vapores em ambientes abertos e fechados a partir do solo subsuperficial contaminado e Ingestão direta de água subterrânea ou indireta, a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado) já apresentam valores maiores ou iguais o risco alvo estabelecido.

As propriedades físico-químicas do Benzeno, como alta volatilidade e elevada constante de Henry (Tabela 4.5), indicam que o seu compartimento ambiental alvo é o ar, justificando desta forma, os elevados valores de risco (maiores que o risco alvo carcinogênico) para as vias de exposição de inalação. Da mesma forma, estudos realizados por Chen e Ma (2006) e Couto (2006) indicaram que as vias principais e dominantes de ingresso estão vinculadas à inalação de vapores e ingestão de águas subterrânea, indo de encontro aos resultados observados.

Para os receptores residenciais urbanos adultos e crianças o modelo RISC 4 apresenta os valores de risco total mais conservadores,  $6,11 \times 10^{-4}$  e  $8,13 \times 10^{-4}$ , respectivamente, enquanto que as Planilhas CETESB apresentam os maiores valores de risco carcinogênico:  $1,51 \times 10^{-2}$  e  $7,12 \times 10^{-3}$  (Figura 4.2). Já para os receptores Trabalhadores de Obras Civas e Trabalhadores Comerciais/Industriais o modelo RBCA *ToolKit* apresenta os valores de risco total mais conservadores,  $4,36 \times 10^{-5}$  e  $1,56 \times 10^{-3}$ , respectivamente, enquanto que as Planilhas CETESB apresentam os maiores valores de risco carcinogênico:  $4,67 \times 10^{-4}$  e  $5,27 \times 10^{-3}$  (Figura 4.2).

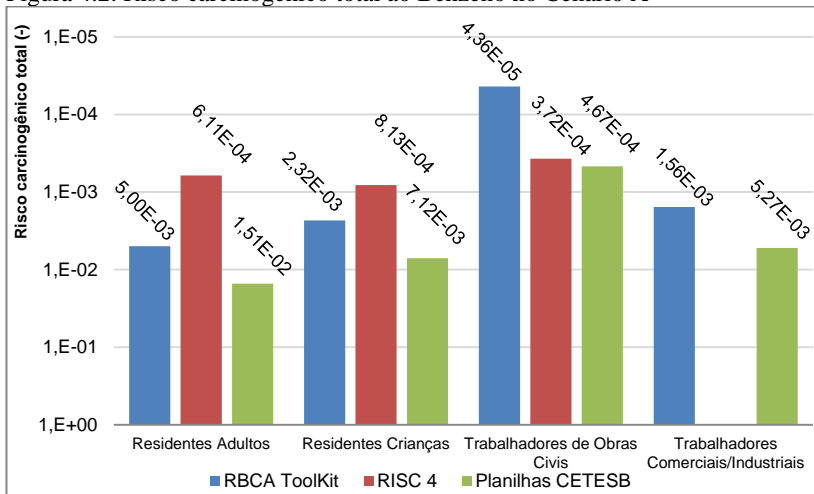
Os elevados valores de risco, calculados pelas Planilhas CETESB, para todos os receptores, podem estar associados aos bancos de dados físico-químico e toxicológico *default* do modelo (Tabela 4.4 e Tabela 4.5). Observa-se, na Tabela 4.4, que a Planilha CETESB apresenta os maiores valores de *Slope Factor* para o Benzeno, dentre os modelos avaliados. Já na Tabela 4.5 verifica-se que a difusividade no ar para o Benzeno das Planilhas CETESB ( $8,95 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), é a maior dentre todos os modelos, enquanto que a difusividade na água é a menor. O parâmetro difusividade é necessário na quantificação do risco para as vias de exposição de inalação (SPENCE e WALDEN, 2001; CONNOR *et al.*, 2007; CETESB, 2014b), sendo estas vias (inalação a partir do solo subsuperficial em ambientes abertos e fechados),

conforme salientado anteriormente, dominantes na quantificação do risco carcinogênico ao Benzeno.

Conforme exposto na Figura 4.2, é verificada diferença de até duas ordens de grandeza no risco carcinogênico total para Residentes Adultos:  $6,11 \times 10^{-4}$  (RISC 4) e  $1,51 \times 10^{-2}$  (Planilhas CETESB). Para os receptores Residentes Crianças e Trabalhadores de Obras Cíveis, a diferença entre os valores de risco carcinogênico total entre os modelos avaliados é de uma ordem de grandeza (Figura 4.2). Já para os Trabalhadores Comerciais/Industriais ambos os modelos avaliados, RBCA *Toolkit* e Planilhas CETESB, apresentam risco carcinogênico total na ordem de  $10^{-3}$  (Figura 4.2).

Xavier e Loureiro (2004) verificaram que os receptores residenciais apresentam valores maiores de risco carcinogênico que receptores comerciais (tanto para vias de exposição de água subterrânea como de solo superficial e subsuperficial), em conformidade com os resultados obtidos neste estudo,. Este resultado pode estar associado a maior duração de exposição ao cenário de contaminação (Duração da exposição) dos receptores Residentes adultos (30 anos) entre todos receptores avaliados (Tabela 4.1).

Figura 4.2. Risco carcinogênico total ao Benzeno no Cenário A



#### 4.2.4.2 Índice de perigo ao Chumbo no Cenário A

Os resultados da quantificação do índice de perigo (risco não carcinogênico) ao Chumbo, no Cenário A, por receptor, via de exposição e modelo avaliado, são apresentados na Tabela 4.9. Também são apresentados os resultados do somatório dos índices de perigo das vias de exposição consideradas, conforme Equação 6 (Índice de perigo total). O Índice de perigo total é apresentado por modelo de ARSH avaliado. Analogamente, são apresentados os pesos dos riscos não carcinogênicos de cada uma das vias de exposição avaliadas, no índice de perigo total. O peso ou contribuição das vias foi calculado a partir da Equação 11.

O modelo *RBCA ToolKit* não apresenta, em seu banco de dados *default*, para a substância metálica Chumbo, as Doses de referência oral (RfD<sub>O</sub>), dérmica (RfD<sub>D</sub>) e de inalação (RfD<sub>I</sub>), os quais são necessários a quantificação do índice de perigo para as vias de exposição consideradas. Os resultados apresentados na Tabela 4.9 e Figura 4.3, referem-se somente aos modelos RISC 4 e Planilhas CETESB.

O risco alvo não carcinogênico estabelecido ( $1 \times 10^0$ ) foi ultrapassado para as seguintes vias de exposição e modelos: ingestão acidental de solo superficial contaminado (RISC 4 e Planilhas CETESB) e ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial (Planilhas CETESB) (Tabela 4.9). Já para o somatório das vias de exposição consideradas (Índice de perigo total), o risco alvo não carcinogênico foi ultrapassado para todos os receptores e modelos avaliados, à exceção de Residentes Adultos e Trabalhadores de Obras Civis no modelo RISC 4 (Tabela 4.9 e Figura 4.3).

O RISC 4 apresenta valores mais conservadores de Índice de perigo total ao Chumbo, pois não contempla a via de exposição Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial, via esta que apresenta alto risco, conforme verificado para os demais modelos (Tabela 4.8 e Tabela 4.9). Constata-se ainda que a Taxa de ingestão de solo e a Frequência de exposição para os Trabalhadores de Obras Civis do RISC 4 são inferiores as Taxa de ingestão de solo e a Frequência de exposição das Planilhas CETESB, o que também contribuiria para os resultados assinalados na Tabela 4.9.

Os elevados valores dos Coeficientes de distribuição verificados para o Chumbo (Tabela 4.6) indicam que o seu compartimento ambiental alvo é o solo, justificando desta forma, a relevância da via de

exposição de ingestão acidental de solo superficial (Tabela 4.9). Diferentemente, observa-se que na quantificação do risco carcinogênico ao Benzeno (Tabela 4.8), que a via de exposição em questão apresenta “peso” desprezível na quantificação do risco total. Salienta-se que a impossibilidade de quantificação do índice de perigo ao Chumbo para as vias de exposição de inalação (composto não volátil) também são responsáveis pela relevância da via de exposição de ingestão ao solo

Para as Planilhas CETESB, a ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado é a via de exposição que mais contribui no Índice de Perigo Total: 80,47% para Residentes Adultos e 62% para Residentes Crianças e Trabalhadores de Obras Civis (Tabela 4.9).

Para o modelo RISC 4 a via de exposição que apresenta maior peso é a ingestão acidental de solo superficial contaminado: 47,26% para Residentes Adultos, 77,75% para Residentes Crianças e 56,13% para Trabalhadores de Obras Civis.

Os índices de perigo totais ao Chumbo, por receptor e modelo avaliado no Cenário A, são apresentados na Figura 4.3.

O risco alvo não carcinogênico estabelecido (01) foi ultrapassado para todos os receptores avaliados das Planilhas CETESB, enquanto que para o modelo RISC 4, somente o receptor Residentes Crianças apresenta índice de perigo total maior que 01. (Figura 4.3).

As Planilhas CETESB apresentam, para todos os receptores avaliados, valores maiores de índice de perigo total ao Chumbo que o modelo RISC 4 (Figura 4.3). A diferença entre os valores apresentados pelos modelos é de uma ordem de grandeza para os receptores Residentes Adultos, Residentes Crianças e Trabalhadores de Obras Civis (Figura 4.3). O maior valor de índice de perigo total é verificado para Residentes Crianças,  $1,18 \times 10^1$  (Planilhas CETESB) e o menor para Trabalhadores de Obras Civis,  $4,81 \times 10^{-1}$  (RISC 4) (Figura 4.3).

O baixo valor de peso corpóreo dos receptores residentes crianças (15 kg) (Tabela 4.1) associado a sua relevância na quantificação do risco (CHANG *et al.*, 2004; COUTO, 2006) justificam o alto índice de perigo ao Chumbo quantificado para ambos os modelos para os receptores crianças residentes em áreas urbanas (Figura 4.3).

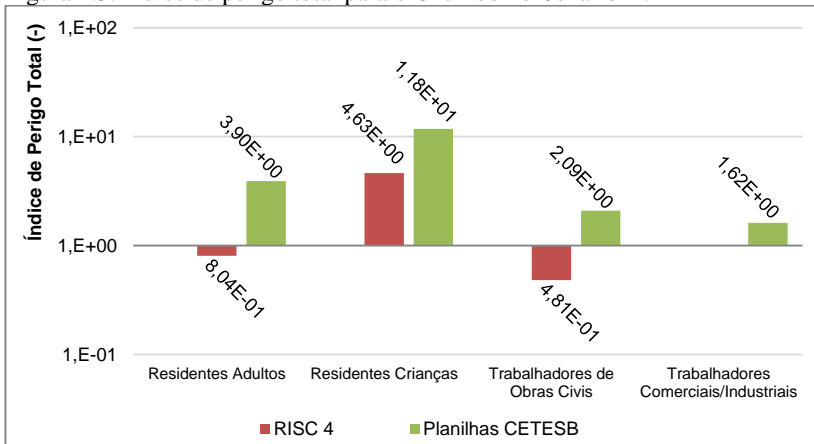
O modelo RISC 4 apresenta índice de Perigo ao Chumbo para Trabalhadores de obras civis menor que o modelo RISC 4. A taxa de ingestão de solo e a Frequência de exposição para os Trabalhadores de Obras Civis do RISC 4 são inferiores as Taxa de ingestão de solo e a Frequência de exposição das Planilhas CETESB, justificando os resultados apresentados na Figura 4.3 .

Tabela 4.9. Índice de perigo total e por via de exposição ao Chumbo para o Cenário A.

Vias de exposição	Residentes Adultos				Residentes Crianças				Trabalhadores de Obras Civas			
	RISC 4		Planilhas CETESB		RISC 4		Planilhas CETESB		RISC 4		Planilhas CETESB	
	I.P. (-)	Peso (%)	I.P. (-)	Peso (%)	I.P. (-)	Peso (%)	I.P. (-)	Peso (%)	I.P. (-)	Peso (%)	I.P. (-)	Peso (%)
<b>Ingestão de água subterrânea contaminada</b>	3,80E-01	47,26	3,81E-01	9,76	8,90E-01	19,22	8,88E-01	7,55	1,40E-01	29,11	1,58E-01	7,56
<b>Ingestão acidental de solo superficial</b>	3,80E-01	47,26	3,81E-01	9,76	<b>3,60E+00</b>	77,75	<b>3,55E+00</b>	30,19	2,70E-01	56,13	6,31E-01	30,21
<b>Contato dérmico com solo superficial</b>	4,40E-02	5,47	-	-	1,40E-01	3,02	-	-	7,10E-02	14,76	-	-
<b>Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial</b>	N.C	-	<b>3,14E+00</b>	80,47	N.C	-	<b>7,32E+00</b>	62,26	N.C	-	<b>1,30E+00</b>	62,23
<b>Índice de Perigo Total</b>	<b>8,04E-01</b>	<b>100</b>	<b>3,90E+00</b>	<b>100</b>	<b>4,63E+00</b>	<b>100</b>	<b>1,18E+01</b>	<b>100</b>	<b>4,81E-01</b>	<b>100</b>	<b>2,09E+00</b>	<b>100</b>

Obs.: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em **vermelho**, indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido (1); "I.P." Índice de perigo

Figura 4.3. Índice de perigo total para o Chumbo no Cenário A.



#### 4.2.4.3 Concentrações máximas aceitáveis resultantes no Cenário A

Os resultados das concentrações máximas aceitáveis resultantes para o Benzeno e o Chumbo no Cenário A, são apresentados nas Tabela 4.10 e Tabela 4.11, respectivamente. São apresentadas as CMA por receptor, modelo e compartimento ambiental avaliados. Os valores das concentrações máximas aceitáveis por via de exposição, quantificadas para os modelos avaliados, podem ser verificados no Apêndice A.

A concentração máxima aceitável resultante, por compartimento ambiental, refere-se a CMA de menor valor (mais restritiva) entre as CMA das vias de exposição consideradas para o compartimento ambiental em questão. As vias de exposição consideradas em cada compartimento ambiental, são:

- Água subterrânea: ingestão de água subterrânea contaminada, inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea contaminada e inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea contaminada;
- Solo subsuperficial: inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial contaminado, inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial contaminado e ingestão de água subterrânea contaminada a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado; e



- Solo superficial: ingestão acidental de solo superficial contaminado e contato dérmico com solo superficial contaminado.

A partir dos resultados apresentados no Apêndice A, é verificado que a CMA resultante de cada compartimento ambiental avaliado, para o Benzeno, é originária da mesma via de exposição. As vias de exposição em questão, por compartimento ambiental, são: ingestão de água subterrânea (água subterrânea), ingestão de água subterrânea contaminada a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (solo subsuperficial) e ingestão acidental de solo superficial contaminado (solo superficial). A

O modelo Planilhas CETESB, apresenta, de modo geral, as concentrações máximas aceitáveis resultantes mais restritivas para todos os compartimentos ambientais avaliados (Tabela 4.10). Análogo ao verificado na quantificação do risco, as CMA resultantes mais restritivas, calculados pelas Planilhas CETESB, podem estar associadas aos bancos de dados físico-químico e toxicológico *default* do modelo (Tabela 4.4 e Tabela 4.5) os quais apresentam valores mais expressivos de parâmetros, tais como: *Slope Factor* e difusividade no ar.

Na água subterrânea as Planilhas CETESB apresentam CMA resultantes mais restritiva para os receptores: Residentes Adultos ( $0,016 \text{ mg.L}^{-1}$ ), Residentes Crianças ( $0,034 \text{ mg.L}^{-1}$ ) e Trabalhadores Comerciais/Industriais ( $0,046 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Para os receptores Trabalhadores de Obras Cívicas, a CMA resultante na água subterrânea mais restritiva, é a quantificada pelo RISC 4 ( $0,099 \text{ mg.L}^{-1}$ ) (Tabela 4.10).

No solo subsuperficial as Planilhas CETESB apresentam CMA resultantes mais restritiva para todos os receptores avaliados: Residentes Adultos ( $0,007 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), Residentes Crianças ( $0,014 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), Trabalhadores de Obras Cívicas ( $0,150 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) e Trabalhadores Comerciais/Industriais ( $0,020 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) (Tabela 4.10).

No solo superficial, o modelo RISC 4 apresenta os valores de CMA mais restritivos para os receptores Residentes Adultos ( $270 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) e Trabalhadores de Obras Cívicas ( $270 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). Já as Planilhas CETESB apresentam os valores mais restritivos para os receptores Residentes Crianças ( $220 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) e Trabalhadores Comerciais/Industriais ( $923 \text{ mg.kg}^{-1}$ ).

As concentrações máximas aceitáveis resultantes mais conservadoras, conforme observado na Tabela 4.10, são as quantificadas pelo modelo RBCA *ToolKit*, à exceção da CMA em solo subsuperficial, para a qual, o modelo RISC 4 se mostrou o menos restritivo, para todos os receptores, dentre os modelos avaliados.

## S

A equação para quantificação do risco (Equação 3) é o inverso da equação para o estabelecimento das CMA (Equação 7), portanto quanto maior o risco quantificado, menor (mais restritivo) será o valor da CMA estabelecida. Isto posto, verifica-se que os resultados apresentados no Apêndice A e na Tabela 4.10, estão em conformidade os resultados do risco carcinogênico ao Benzeno (Tabela 4.8), onde por exemplo, a via de exposição ingestão de água subterrânea contaminada apresenta um risco maior que inalação em ambientes abertos e fechados a partir da água subterrânea.

Os valores de referência genéricos baseados no risco (*RBSL*), são quantificados com as equações e modelos preconizados na metodologia RBCA, a partir de cenários de exposição padronizados para diferentes usos e ocupações do solo e um risco alvo estabelecido (CONAMA, 2009; ASTM, 2010). Comparando os valores apresentados na Tabela 4.10 com os *Risk-Based Screening Levels - RBSL* do Benzeno, para solo ( $0,15 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) e água subterrânea ( $0,005 \text{ mg.L}^{-1}$ ), estabelecidos na Resolução CONAMA nº 420 (2009), verifica-se que os modelos RBCA *ToolKit* e Planilhas CETESB, para solo subsuperficial, apresentam valores mais restritivas que os *RBSL*.

Tabela 4.10. Concentrações máximas aceitáveis resultantes, por compartimento ambiental, para o Benzeno no Cenário A.

Receptor	Compartimento ambiental	RBCA <i>ToolKit</i>	Software RISC 4	Planilhas CETESB
Residentes Adultos	água subterrânea (mg/L)	0,057	0,029	0,016
	solo subsuperficial (mg/kg)	0,020	0,180	0,007
	solo superficial (mg/kg)	1.100	270	319
Residentes Crianças	água subterrânea (mg/L)	0,063	0,063	0,034
	solo subsuperficial (mg/kg)	0,023	0,250	0,014
	solo superficial (mg/kg)	310	220	171
Trabalhadores de Obras Civas	água subterrânea (mg/L)	0,570	0,099	0,350
	solo subsuperficial (mg/kg)	0,200	0,380	0,150
	solo superficial (mg/kg)	5.700	270	1.760
Trabalhadores Comerciais/Industriais	água subterrânea (mg/L)	0,190	N.C.	0,046
	solo subsuperficial (mg/kg)	0,069	N.C.	0,020
	solo superficial (mg/kg)	3.800	N.C.	923

Obs.: "N.C." Receptor não contemplado pelo software; Valores em **vermelho** indicam CMA mais restritiva que *RBSL* estabelecidos para o Benzeno em solo ( $0,15 \text{ mg.kg}^{-1}$  – solo industrial e  $0,08 \text{ mg.kg}^{-1}$  - solo residencial) e água subterrânea ( $0,005 \text{ mg.L}^{-1}$ ) por CONAMA (2009).

A partir dos resultados apresentados no Apêndice A, é verificado que a CMA resultante de cada compartimento ambiental avaliado, para o Chumbo, é originária da mesma via de exposição, de forma análoga ao verificado para o Benzeno. As vias de exposição em questão são: ingestão de água subterrânea (água subterrânea), ingestão de água subterrânea contaminada a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (solo subsuperficial) e ingestão acidental de solo superficial contaminado (solo superficial).

O RISC 4, conforme verificado na Tabela 4.11, apresenta as concentrações máximas aceitáveis resultantes mais restritivas para o receptor Residentes Adultos:  $0,130 \text{ mg.L}^{-1}$  (água subterrânea) e  $2.400 \text{ mg.kg}^{-1}$  (solo superficial).

O modelo Planilhas CETESB apresenta, para o receptor Trabalhador de Obras Civas, as concentrações máximas aceitáveis resultantes mais restritivas na água subterrânea e no solo superficial dentre os modelos avaliados,  $0,320 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $1.590 \text{ mg.kg}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 4.11).

Para os receptores Residentes Crianças, é verificado que ambos os modelos, RISC 4 e Planilhas CETESB, apresentam CMA resultantes na água subterrânea equivalentes ( $0,056 \text{ mg.L}^{-1}$ ), enquanto que para o solo superficial apesar de próximos os valores, a CMA do modelo RISC 4 é mais restritiva ( $270 \text{ mg.kg}^{-1}$ ).

Observa-se (Tabela 4.11), que os valores das concentrações máximas aceitáveis resultantes em água subterrânea quantificados por ambos os modelos, são muito próximos, sendo inclusive, semelhantes para o receptor Residentes Crianças. A taxa de ingestão de água subterrânea - necessária à quantificação das CMA resultantes para a via de exposição de ingestão água subterrânea - é semelhante para todos os modelos avaliados (Tabela 4.1), desta forma, e considerando a sua preeminência na quantificação do risco (COUTO, 2006), são justificados os valores similares das CMA em ambos os modelos avaliados.

Comparando os valores apresentados na Tabela 4.11 com os *Risk-Based Screening Levels - RBSL* do Chumbo, para solo ( $900 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) e água subterrânea ( $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ ), estabelecidos na Resolução CONAMA nº 420 (2009), é observado que: as Planilhas CETESB apresentam valores mais restritivos de CMA no solo subsuperficial que os *RBSL*. Para os demais compartimentos ambientais avaliados, solo superficial e água subterrânea, ambos os modelos apresentaram CMA menos restritivas que os *RBSL*.

Tabela 4.11. Concentrações máximas aceitáveis resultantes, por compartimento ambiental, para o Chumbo no Cenário A.

Receptor	Compartimento ambiental	Software	
		RISC 4	Planilhas CETESB
Residentes Adultos	água subterrânea (mg/L)	0,130	0,131
	solo subsuperficial (mg/kg)	-	319
	solo superficial (mg/kg)	2.400	2.630
Residentes Crianças	água subterrânea (mg/L)	0,056	0,056
	solo subsuperficial (mg/kg)	-	137
	solo superficial (mg/kg)	270	282
Trabalhadores de Obras Civis	água subterrânea (mg/L)	0,370	0,320
	solo subsuperficial (mg/kg)	-	769
	solo superficial (mg/kg)	2.900	1.590
Trabalhadores Comerciais/Industriais	água subterrânea (mg/L)	N.C.	0,320
	solo subsuperficial (mg/kg)	N.C.	769
	solo superficial (mg/kg)	N.C.	6.340

Obs.: (-) Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação das CMA; "N.C." Receptor não contemplado pelo software; Valores em **vermelho** indicam CMA mais restritiva que RBSL estabelecidos para o Chumbo em solo (900 mg.kg<sup>-1</sup> – solo industrial e 300 mg.kg<sup>-1</sup> – solo residencial) água subterrânea (0,01 mg.L<sup>-1</sup>) por CONAMA (2009).

#### 4.2.5 Quantificação da exposição no Cenário B

O segundo cenário (Cenário B), considerou como dados de entrada semelhantes nos três modelos (não *default*), além dos dados supracitados do Cenário A, as propriedades físico-químicas e toxicológicas dos compostos químicos de interesse e os parâmetros de exposição dos receptores - para as vias de exposição consideradas no modelo conceitual de exposição (Item 4.2.2). Demais dados de entrada, necessários a quantificação do risco e das CMA, dos modelos, foram mantidos os valores *default* dos *softwares*.

O cenário B tem como objetivo avaliar a influência dos bancos de dados físico-químicos e toxicológicos dos CQI e dos parâmetros de exposição dos receptores na quantificação do risco e das CMA para as vias de exposição diretas e ingestão de água subterrânea contaminada a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado.

Segundo Rikken e Lijzen (2004), as vias de exposição podem ser diretas ou indiretas. A via de exposição é direta quando não há etapas intermediárias entre a fonte e o ponto de exposição. A exposição é indireta quando a substância ou contaminante passa através de meios diferentes, no qual tem, pelo menos, uma etapa intermediária de liberação ou biotransformação, entre a fonte e o ponto de exposição.

As vias de exposição de quantificação direta do risco independem de um modelo de transporte e transformação de contaminantes na determinação da concentração de exposição para a quantificação do risco e da CMA (SPENCE e WALDEN, 2001; CONNOR *et al.*, 2007; ASTM, 2010; CETESB, 2014b). O ponto de exposição do receptor é no compartimento ambiental inicialmente contaminado, desta forma a exposição ao CQI é direta e a sua concentração é obtida a partir da Tabela 4.3.

As vias de exposição de quantificação direta do risco, avaliadas na análise comparativa entre os Cenários A e B são:

- Ingestão de água subterrânea contaminada; e
- Ingestão acidental de solo superficial contaminado.

Os valores selecionados para os parâmetros toxicológicos e físico-químicos dos contaminantes, bem como para os parâmetros de exposição dos receptores foram os dispostos nas Planilhas CETESB (2014b). Os parâmetros toxicológicos e físico-químicos dos CQI considerados neste trabalho e os parâmetros de exposição dos

receptores, inseridos como dados de entrada não *default* nos três modelos avaliados, são apresentados nas Tabela 4.12, Tabela 4.13 e Tabela 4.14, respectivamente.

Tabela 4.12. Parâmetros toxicológicos dos CQI no Cenário B.

CQI	RfD <sub>O</sub> (mg.kg <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> )	RfD <sub>I</sub> (mg.kg <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> )	RfD <sub>D</sub> (mg.kg <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> )	ABS <sub>D</sub> (-)
Benzeno	4,00E-03	8,57E-03	4,00E-03	-
Chumbo	3,60E-03	-	3,60E-03	-

Tabela 4.12. Parâmetros toxicológicos dos CQI no Cenário B (continuação).

CQI	Sf <sub>O</sub> (mg/kg-day) <sup>-1</sup>	Sf <sub>I</sub> (mg/kg-day) <sup>-1</sup>	Sf <sub>D</sub> (mg/kg-day) <sup>-1</sup>	ABS <sub>GI</sub> (%)
Benzeno	5,50E-02	2,73E-02	5,50E-02	100
Chumbo	-	-	-	100

Obs.: RfD Dose de referência; "O" vias de exposição de ingestão; "I" vias de exposição de inalação; "D" vias de exposição de contato dérmico; (-) Parâmetro não disponível para o CQI em questão; ABS<sub>GI</sub> Fator de absorção gastrointestinal; e ABS<sub>D</sub> Fator de absorção dérmica.

Tabela 4.13. Parâmetros físico-químicos dos CQI no Cenário B.

Composto químico de interesse	Parâmetros físico-químicos					
	Peso molecular	Constante da Lei de Henry	Densidade	Coefficiente de partição normalizado pelo carbono orgânico (Koc)	Solubilidade em água	Coefficiente de difusão no ar
	(g/mol)	(-)	(g/mL)	(L/kg)	(mg/L)	(cm <sup>2</sup> /s)
Benzeno	78,11	0,23	0,88	61,70	1.790	8,95E-02
Chumbo	207,20	-	11,30	-	-	-

Tabela 4.13. Parâmetros físico-químicos dos CQI no Cenário B (continuação).

Composto químico de interesse	Parâmetros físico-químicos					
	Coefficiente de difusão na água	Coefficiente de distribuição (Kd)	Tempo de meia-vida	Constante de permeabilidade dérmica	Logaritmo do Coeficiente de partição octanol-água (log Kow)	Pressão de vapor
	(cm <sup>2</sup> /s)	(L/kg)	(ano)	(cm/hora)	(-)	(mmHg)
Benzeno	1,03E-05	0,19	1,97	1,49E-02	2,13	96,66
Chumbo	-	2.131,00	-	1,00E-04	-	-

Obs.: (-) Parâmetro não disponível para o CQI em questão.



Tabela 4.14. Parâmetros de exposição dos receptores no Cenário B.

Parâmetros de exposição	Unidade	Receptor			
		Residentes em áreas urbanas*		Trabalhador comercial/industrial	Trabalhador em obras civis ou de escavação
		Criança	Adulto		
Duração da exposição	anos	6	30	25	2
Expectativa de Vida	anos	72	72	72	72
Tempo médio para efeitos carcinogênicos	dias	26.280	26.280	26.280	26.280
Tempo médio para efeitos não carcinogênicos	dias	2.190	10.950	9.125	730
Massa corpórea	kg	15	70	70	70
Tempo de exposição para contato dérmico com água subterrânea	horas/dia	2	4	2	8
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes abertos	horas/dia	8	8	8	8
Tempo de exposição para inalação de vapores em ambientes fechados	horas/dia	16	16	8	8
Frequência da exposição	dias/ano	350	350	290	290
Frequência de eventos para contato dérmico com o solo	eventos/dia	1	1	1	1
Taxa de ingestão de solo	mg/dia	200	100	50	200
Taxa de inalação diária em ambientes fechados	m <sup>3</sup> /hora	0,62	0,95	1,2	1,2
Taxa de inalação diária em ambientes abertos	m <sup>3</sup> /hora	0,78	1,2	1,2	1,2
Taxa de ingestão diária de água	L/dia	1	2	1	1
Fator de aderência do solo na pele	mg/cm <sup>2</sup> .evento	0,2	0,07	0,2	0,2
Área superficial da pele disponível para contato dérmico	cm <sup>2</sup>	4783	10367	2457	2457

Obs.: (\*) Serão chamados, abreviadamente, de “Residentes”.

#### 4.2.6 Análise comparativa Cenário A vs. Cenário B

O Apêndice A apresenta os resultados do risco carcinogênico, índice de perigo e das CMA no Cenário B com todos os modelos avaliados, discretizados por CQI, por receptor e para todas as vias de exposição comuns aos modelos. Os resultados aqui apresentados para o Cenário B, conforme justificado no Item 4.2.5, referem-se somente as vias de exposição diretas e ingestão de água subterrânea contaminada a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado. A via de exposição Ingestão de água subterrânea contaminada a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado também foi incluída na análise comparativa entre os Cenários A e B por apresentar um modelo simplificado de transporte e transformação de contaminantes.

A quantificação do índice de perigo no *RBCA ToolKit* só é possível para receptores residentes adultos, adolescentes e crianças a partir dos parâmetros de exposição *default* do modelo. Desta forma, a análise comparativa quantitativa do índice de perigo, para o Cenário B, se limitou aos *softwares* RISC 4 e Planilhas CETESB.

##### 4.2.6.1 Análise comparativa do risco carcinogênico e não carcinogênico entre os Cenários A e B

Nas Tabela 4.15 e Tabela 4.16 são apresentados os resultados do risco carcinogênico e índice de perigo dos cenários comparativos A e B. Os valores apresentados referem-se à média aritmética entre os riscos dos receptores considerados, por via de exposição e risco total. Analogamente, são apresentados os desvios padrão ( $\sigma$ ), calculados entre os riscos dos receptores e por via de exposição.

Foram calculadas as diferenças absolutas entre o maior e o menor valor do risco quantificado entre os modelos, para uma via de exposição e para os Cenários A e B, e as diferenças relativas entre as vias de exposição (Tabela 4.15 e Tabela 4.16). A diferença relativa é o quociente da diferença absoluta do risco por via de exposição pela diferença absoluta do risco total. A diferença relativa auxilia a demonstrar a influência de cada via de exposição no risco total (CHEN e MA, 2006).

Os resultados apresentados nas Tabela 4.15 e Tabela 4.16 demonstram que os valores das diferenças absolutas de todas as vias de exposição do Cenário B são menores que os valores das diferenças absolutas do Cenário A. Por exemplo, para a via de exposição Ingestão

de água subterrânea contaminada, o Cenário A apresenta diferença absoluta de  $3,18 \times 10^{-6}$ , já para o Cenário B, a diferença absoluta é ligeiramente inferior,  $2,17 \times 10^{-6}$  (Tabela 4.15).

No Cenário B, o risco carcinogênico ao Benzeno, quantificado pelos modelos *RBCA Toolkit* e RISC 4, para as vias de exposição Ingestão de água subterrânea e Ingestão acidental de solo superficial contaminado são semelhantes,  $2,16 \times 10^{-6}$  e  $1,30 \times 10^{-7}$ , respectivamente (Tabela 4.15). Considerando que: os parâmetros de exposição dos receptores e o banco de dados do Benzeno são semelhantes para os três modelos no Cenário B e que a quantificação do risco, para as vias de exposição, em questão é direta (Item 4.2.5), os resultados demonstram que ambos os modelos, *RBCA Toolkit* e RISC 4, possuem algoritmos equivalentes para a quantificação do risco para as vias de exposição em questão.

A quantificação da diferença relativa (Tabela 4.15 e Tabela 4.16) corrobora com os resultados obtidos nas Tabela 4.8 e Tabela 4.9, de que, em ambos os cenários, a via de exposição Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado é via que mais contribui para o risco total.

A diferença relativa da via de exposição Ingestão acidental de solo superficial contaminado é superior à diferença relativa da via Ingestão de água subterrânea, para o CQI Chumbo (Tabela 4.16). Já para o Benzeno (Tabela 4.15), ocorre o oposto, a ingestão de água subterrânea contaminada apresenta um peso maior no risco total que a ingestão acidental de solo.

Conforme salientado nos Itens 4.2.4.1 e 4.2.4.2, os elevados valores dos Coeficientes de distribuição verificados para o Chumbo (Tabela 4.6) indicam que o seu compartimento ambiental alvo é o solo, justificando desta forma a via Ingestão acidental de solo superficial apresentar a maior diferença relativa. Já o Benzeno, com alta volatilidade e elevada constante de Henry (Tabela 4.5), possui o ar como seu compartimento ambiental, esclarecendo, desta forma, a maior diferença relativa para a via Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado.

Tabela 4.15. Comparação dos resultados do Risco carcinogênico ao Benzeno para os Cenários A e B.

Cenário	Modelo	Ingestão de água subterrânea contaminada	Ingestão acidental de solo superficial contaminado	Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial contaminado	Total	
A	<b>RBCA ToolKit</b>	1,15E-06 $\sigma = 9,36E-07$	6,89E-08 $\sigma = 6,13E-08$	<b>2,19E-03</b> $\sigma = 1,76E-03$	<b>2,19E-03</b>	
	<b>Risco carcinogênico (-)</b>	<b>RISC 4</b>	3,00E-06 $\sigma = 1,53E-06$	1,97E-07 $\sigma = 9,18E-08$	-	<b>3,20E-06</b>
		<b>Planilhas CETESB</b>	4,33E-06 $\sigma = 3,30E-06$	2,61E-07 $\sigma = 2,14E-07$	<b>6,81E-03</b> $\sigma = 5,19E-03$	<b>6,82E-03</b>
		<b>Diferença Absoluta<sup>1</sup> (-)</b>	3,18E-06	1,92E-07	4,63E-03	<b>6,81E-03</b>
		<b>Diferença Relativa<sup>2</sup> (%)</b>	0,0005	0,00003	0,68	
	B	<b>RBCA ToolKit</b>	2,16E-06 $\sigma = 1,65E-06$	1,30E-07 $\sigma = 1,06E-07$	<b>4,01E-03</b> $\sigma = 3,05E-03$	<b>4,01E-03</b>
<b>Risco carcinogênico (-)</b>		<b>RISC 4</b>	2,16E-06 $\sigma = 1,65E-06$	1,30E-07 $\sigma = 1,06E-07$	-	<b>2,29E-06</b>
		<b>Planilhas CETESB</b>	4,33E-06 $\sigma = 3,30E-06$	2,61E-07 $\sigma = 2,14E-07$	<b>6,81E-03</b> $\sigma = 5,19E-03$	<b>6,82E-03</b>
		<b>Diferença Absoluta<sup>1</sup> (-)</b>	2,17E-06	1,30E-07	2,80E-03	<b>6,81E-03</b>
		<b>Diferença Relativa<sup>2</sup> (%)</b>	0,0003	0,00002	0,41	

Obs.: "-" Banco de dados do modelo não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em **vermelho** indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido ( $10^{-5}$ ); <sup>1</sup> Diferença absoluta entre o maior e menor valor de risco quantificado para a via de exposição em questão; <sup>2</sup> Quociente da diferença absoluta do risco por via de exposição pela diferença absoluta do risco total. ( $\sigma$ ) Desvio padrão populacional.

Tabela 4.16. Comparação dos resultados do Índice de perigo ao Chumbo para os Cenários A e B.

Cenário	Modelo	Ingestão de água subterrânea contaminada	Ingestão acidental de solo superficial contaminado	Total	
A	Índice de Perigo (-)	RISC 4	4,70E-01 $\sigma = 3,13E-01$	1,42E+00 $\sigma = 1,54E+00$	1,89E+00
		Planilhas CETESB	3,96E-01 $\sigma = 2,98E-01$	1,18E+00 $\sigma = 1,38E+00$	1,58E+00
	Diferença Absoluta <sup>1</sup> (-)	7,38E-02	2,37E-01	3,10E-01	
	Diferença Relativa <sup>2</sup> (%)	0,24	0,76		
B	Índice de Perigo (-)	RISC 4	3,98E-01 $\sigma = 2,98E-01$	1,19E+00 $\sigma = 1,40E+00$	1,59E+00
		Planilhas CETESB	3,96E-01 $\sigma = 2,98E-01$	1,18E+00 $\sigma = 1,38E+00$	1,58E+00
	Diferença Absoluta <sup>1</sup> (-)	1,25E-03	1,25E-02	1,37E-02	
	Diferença Relativa <sup>2</sup> (%)	0,9	0,91		

Obs.: Resultados em **vermelho** indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido ( $10^0$ ). <sup>1</sup> Diferença absoluta entre o maior e menor valor de risco quantificado para a via de exposição em questão; <sup>2</sup> Quociente da diferença absoluta do risco por via de exposição pela diferença absoluta do risco total. . ( $\sigma$ ) Desvio padrão populacional.

#### 4.2.6.2 Análise comparativa das CMA resultantes entre os Cenários A e B

Nas Tabela 4.17 e Tabela 4.18 são apresentados os resultados das concentrações máximas aceitáveis resultantes ao Benzeno e ao Chumbo nos cenários comparativos A e B por compartimento ambiental. Os valores apresentados referem-se à média aritmética das CMA entre os receptores avaliados, por compartimento ambiental, desta forma, também são apresentados os respectivos desvios padrões ( $\sigma$ ). Ainda são apresentadas as diferenças absolutas, calculadas entre o maior e o menor valor de CMA, para uma via de exposição nos Cenários A e B (Tabela 4.17 e Tabela 4.18).

É observado (Tabela 4.17) que as diferenças absolutas entre as CMA ao Benzeno, para os compartimentos ambientais água subterrânea e solo superficial, são inferiores no Cenário B. Já para o solo subsuperficial, a diferença absoluta do Cenário B ( $0,991 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) é superior a do Cenário A ( $0,222 \text{ mg.kg}^{-1}$ ).

O modelo RISC 4 apresenta os valores de concentrações máximas aceitáveis mais restritivos nos compartimentos ambientais água subterrânea ( $0,064 \text{ mg.L}^{-1}$ ) e solo superficial ( $253 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) no Cenário A, para o CQI Benzeno (Tabela 4.17). Já no Cenário B a CMA resultante em água subterrânea mais restritiva é a quantificada pelo RBCA *ToolKit* ( $0,028 \text{ mg.L}^{-1}$ ) enquanto que em solo superficial as Planilhas CETESB apresentam o menor valor ( $1,073 \text{ mg.kg}^{-1}$ ).

Para o Chumbo (Tabela 4.18) verifica-se que o Cenário B apresenta diferença absoluta menor entre as concentrações máximas aceitáveis resultantes em água subterrânea ( $0,005 \text{ mg.L}^{-1}$ ) que o Cenário A ( $0,021 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Entretanto, a diferença absoluta entre as concentrações máximas aceitáveis resultantes em solo superficial é maior no Cenário B ( $2,692 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) que no Cenário A ( $854 \text{ mg.kg}^{-1}$ ).

As Planilhas CETESB apresentam os valores de concentrações máximas aceitáveis menos restritivos nos compartimentos ambientais água subterrânea ( $0,064 \text{ mg.L}^{-1}$ ) e solo superficial ( $253 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) para ambos os Cenários A e B, para o CQI Benzeno (Tabela 4.18).

A concentração máxima aceitável resultante calculada pelo modelo RISC 4 para o Chumbo no solo superficial no Cenário B ( $19 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) é mais restritiva que a quantificada no Cenário A ( $1,875 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) (Tabela 4.18), sendo inclusive, mais restritiva que o RBSL estabelecido pela Resolução CONAMA N° 420/2009 ( $900 \text{ mg.kg}^{-1}$ ).

Tabela 4.17. Comparação dos resultados das concentrações máximas aceitáveis ao Benzeno para os Cenários A e B.

Cenário		A			B		
Modelo	Compartimento ambiental	água	solo	solo	água	solo	solo
		subterrânea (mg.L <sup>-1</sup> )	subsuperficial (mg.kg <sup>-1</sup> )	superficial (mg.kg <sup>-1</sup> )	subterrânea (mg.L <sup>-1</sup> )	subsuperficial (mg.kg <sup>-1</sup> )	superficial (mg.kg <sup>-1</sup> )
RBCA <i>ToolKit</i>		0,220	<b>0,078</b>	2.728	0,028	<b>0,009</b>	2.145
		σ = 0,210	σ = 0,073	σ = 2.149	σ = 0,030	σ = 0,010	σ = 2.193
	RISC 4	0,064	0,270	253	0,137	1,000	1.163
		σ = 0,029	σ = 0,083	σ = 23	σ = 0,130	σ = 1,387	σ = 698
Planilhas CETESB		0,112	<b>0,048</b>	793	0,169	<b>0,070</b>	1.073
		σ = 0,138	σ = 0,059	σ = 625	σ = 0,238	σ = 0,098	σ = 1.080
<b>Diferença absoluta<sup>1</sup></b>		<b>0,156</b>	<b>0,222</b>	<b>2.474</b>	<b>0,141</b>	<b>0,991</b>	<b>1.072</b>

Obs.: Valores em **vermelho** indicam CMA mais restritiva que *RBSL* estabelecidos para o Benzeno em solo (0,15 mg.kg<sup>-1</sup>) e água subterrânea (0,005 mg.L<sup>-1</sup>) por CONAMA (2009). <sup>1</sup>Diferença absoluta entre o maior e o menor valor de CMA para o compartimento ambiental em questão. . (σ) Desvio padrão populacional.

Tabela 4.18. Comparação dos resultados das concentrações máximas aceitáveis ao Chumbo para os Cenários A e B.

Cenário		A			B		
Modelo	Compartimento ambiental	água	solo	solo	água	solo	solo
		subterrânea (mg.L <sup>-1</sup> )	subsuperficial (mg.kg <sup>-1</sup> )	superficial (mg.kg <sup>-1</sup> )	subterrânea (mg.L <sup>-1</sup> )	subsuperficial (mg.kg <sup>-1</sup> )	superficial (mg.kg <sup>-1</sup> )
RISC 4		0,185	-	1.857	0,202	-	<b>19</b>
		σ = 0,134		1.140	0,111		
Planilhas CETESB		0,207	<b>499</b>	2.711	0,207	<b>499</b>	2.711
		0,116	278	2.254	0,116	278	2.254
<b>Diferença absoluta<sup>1</sup></b>		<b>0,021</b>	<b>499</b>	<b>854</b>	<b>0,005</b>	<b>499</b>	<b>2.692</b>

Obs.: Valores em **vermelho** indicam CMA mais restritiva que *RBSL* estabelecidos para o Chumbo em solo (900 mg.kg<sup>-1</sup>) e água subterrânea (0,01 mg.L<sup>-1</sup>) por CONAMA (2009). <sup>1</sup>Diferença absoluta entre o maior e o menor valor de CMA para o compartimento ambiental em questão. . (σ) Desvio padrão populacional.

### 4.3 AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE EXPOSIÇÃO

Com o objetivo de avaliar as diferenças entre modelos unidimensionais e bidimensionais na determinação da concentração de exposição, foram simulados, com os modelos RISC 4 e SCBR, o transporte e a transformação da pluma de Benzeno no fluxo subterrâneo e determinada a concentração do contaminante em um ponto de exposição afastado da fonte de contaminação

#### 4.3.1 Simulação do transporte e transformação da pluma de Benzeno no fluxo subterrâneo.

A simulação do transporte e transformação da pluma de Benzeno no fluxo subterrâneo foi realizada a partir da elaboração de um cenário conservador de exposição com base nos estudos realizados por Schneider (2005) e Corseuil *et al.* (2006). O resumo dos dados do cenário conservador de exposição, utilizados como dados de entrada nas simulações são apresentados na Tabela 4.19.

Os valores de carga hidráulica e condutividade hidráulica, estabelecidos para os pontos de análises, para a simulação no modelo SCBR, são apresentados na Tabela 4.20. As cargas hidráulicas foram estabelecidas como condições de contorno para o domínio de simulação enquanto que os valores de condutividade hidráulica foram estabelecidos de modo a demonstrar a heterogeneidade do aquífero.

Para o modelo 1-D, RISC 4, o gradiente hidráulico foi calculado a partir da Equação 18, onde as cargas hidráulicas  $h_{p1}$  e  $h_{p2}$ , foram obtidas a partir da simulação do mapa potenciométrico de fluxo subterrâneo no SCBR, e os dois pontos de carga hidráulica selecionados estão localizados no eixo da pluma de contaminação: Ponto de exposição do receptor (P1) e Fonte de contaminação (P2). O valor de condutividade hidráulica utilizado foi obtido a partir da média harmônica das condutividades hidráulicas dos pontos de análise (Tabela 4.20). O valor do gradiente hidráulico e da condutividade hidráulica, calculado e utilizado nas simulações nos modelos unidimensionais, são, a saber:

- Gradiente hidráulico (i):  $0,051 \text{ m.m}^{-1}$ ;
- Condutividade hidráulica (k):  $2,70 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ .



Tabela 4.19. Dados de entrada nos modelos para a quantificação da concentração de exposição.

Dados		
Parâmetros de Simulação	Domínio de simulação* (m)	100 x 50
	Volumes de controle*	59 (i) x 30 (j)
	Tempo de simulação (anos)	10
Fonte de Contaminação	Dimensões (m)	1,5 <sup>(1)</sup> x 1,0 x 1,0
	Volume de produto derramado* (L)	100
	Distância Fonte-Ponto de exposição (m)	30
Parâmetros do contaminante - Benzeno	Concentração (ug/L)	100
	Retardo	1
	Tempo de meia vida (ano <sup>-1</sup> )	1
Parâmetros do Meio Físico	Densidade do solo (kg.m <sup>-3</sup> )	1.700
	Dispersividade longitudinal (m)	0,1
	Dispersividade transversal (m)	0,001
	Dispersividade vertical** (m)	0
	Fração de carbono orgânico (%)	0,01
	Porosidade efetiva (-)	0,2

Obs.: (\*) Dados de entrada utilizados unicamente na simulação com o SCBR; (\*\*) Dados de entrada utilizados unicamente na simulação com o RISC 4; <sup>(1)</sup> Dimensão da fonte na direção do fluxo subterrâneo.

Tabela 4.20. Cargas hidráulicas e condutividades hidráulicas estabelecidas para os pontos de análise no modelo SCBR.

Ponto de análise	Carga hidráulica (m)	Condutividade hidráulica (cm.s <sup>-1</sup> )
PA-01	10,0	1,00E-04
PA-02	8,5	-
PA-03	7,0	-
PA-04	7,0	-
PA-05	6,5	1,00E-03
PA-06	5,0	1,00E-05
PA-07	5,5	-
PA-08	4,0	-
PA-09	5,0	-

Obs.: (-) Valor não estabelecido.

Na Figura 4.4 é apresentado o resultado do mapa potenciométrico simulado no SCBR a partir dos dados de carga hidráulica e condutividade hidráulica. Também é apresentada a localização dos elementos prescritos no cenário de exposição: pontos de análise (Tabela 4.20), fonte de contaminação e ponto de exposição do receptor. Na Figura 4.5 é apresentado o mapa de distribuição da condutividade hidráulica gerado pelo SCBR pelo método de interpolação do vizinho mais próximo Corseuil *et al.* (2006). Na Figura 4.6 é apresentado os resultados da simulação do transporte e a transformação da pluma de Benzeno no fluxo subterrâneo no SCBR

A simulação da pluma de Benzeno no fluxo subterrâneo demonstrou que, após um ano da ocorrência do derramamento ( $t = 12$  meses) a pluma alcançou cerca de  $2/3$  da distância até o ponto de exposição. O ponto de exposição é atingido, com concentrações superiores a  $5 \mu\text{g/L}$  (BRASIL, 2011), 15 meses após o início do derramamento. Após 10 anos do início da simulação ( $t = 120$  meses) a pluma alcança cerca de 40 metros de comprimento.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que as maiores distâncias atingidas pela pluma ocorrem durante os 12 primeiros meses da simulação. Este resultado está relacionado:

- aos valores de condutividade hidráulica estabelecidos nos pontos de análise próximos a fonte de contaminação e ao ponto de exposição. A condutividade hidráulica no modelo SCBR é interpolada através do método do vizinho mais próximo Corseuil *et al.* (2006), deste modo a condutividade hidráulica na área do domínio de simulação, entre os pontos PA-01 ( $k = 1,00 \times 10^{-4}$ ) e PA-05 ( $k = 1,00 \times 10^{-3}$ ) (área onde está localizada a fonte de contaminação e o ponto de exposição) é maior que a condutividade hidráulica na área entre os pontos PA-05 ( $k = 1,00 \times 10^{-3}$ ) e PA-06 ( $k = 1,00 \times 10^{-5}$ ) (área após o ponto de exposição).(Figura 4.5)
- ao gradiente hidráulico mais acentuado na área do domínio de simulação entre a fonte de contaminação e o ponto de exposição, conforme verificado na Figura 4.4. Segundo estudo realizado por Schneider (2006), a velocidade do fluxo subterrâneo, representada dentre outros fatores pelo gradiente hidráulico e pela condutividade hidráulica, é um dos parâmetros mais significativos sobre a variação da concentração da pluma de um contaminante em um dado ponto

de exposição. O aumento da velocidade, além de aumentar a taxa de transferência de massa do contaminante da fonte para a água subterrânea, favorece o deslocamento dos contaminantes, aumentando o alcance da pluma.

- ao tempo de meia de  $1 \text{ ano}^{-1}$  convencionado para o Benzeno. O tempo de meia vida do contaminante é definido com o tempo necessário para reduzir a concentração inicial em 50% (WIEDEMEIER *et al.*, 1999a), justificando desta maneira, a menor migração da pluma após 01 ano do início da simulação.

Figura 4.4 Mapa potenciométrico simulado no SCBR.

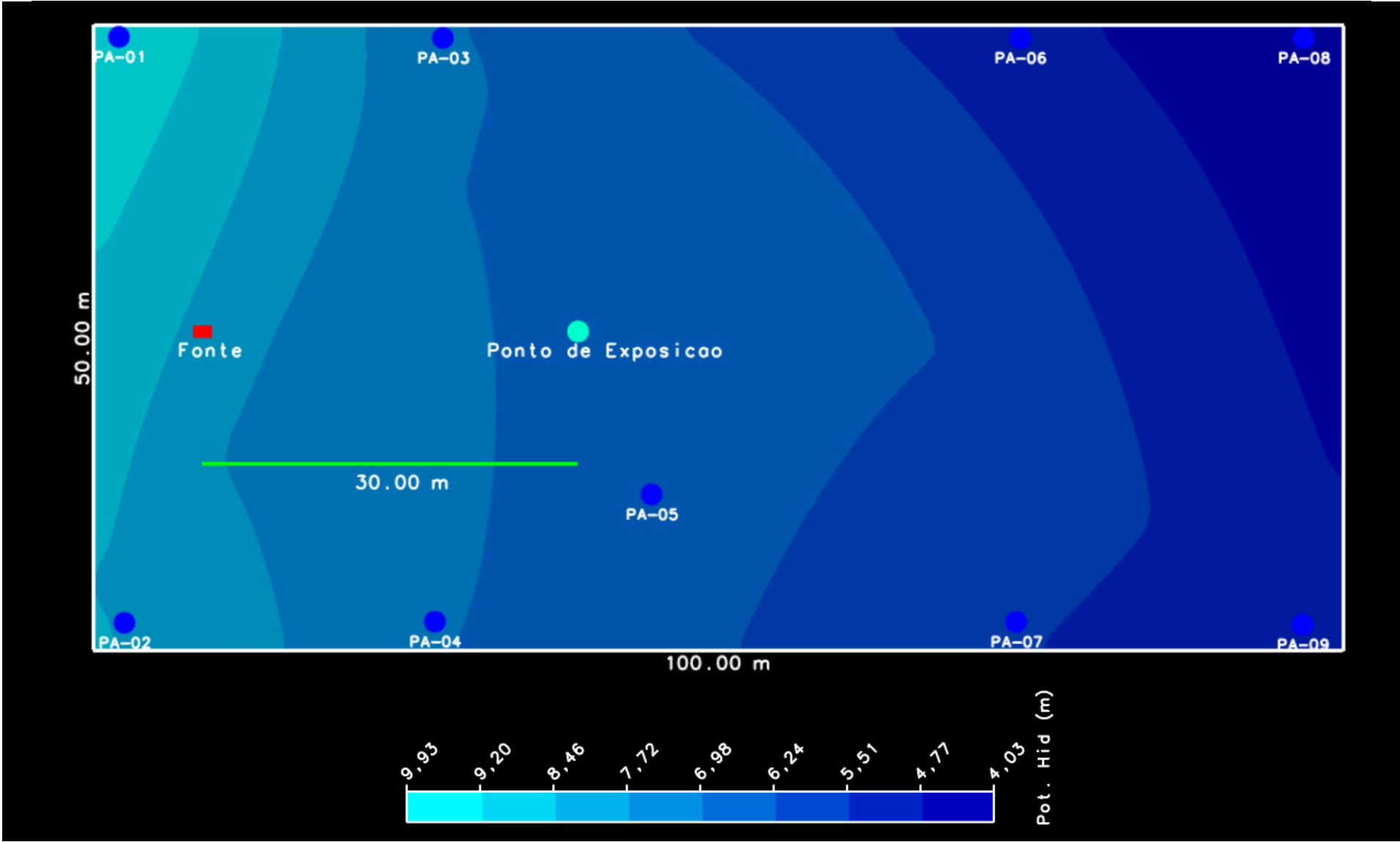


Figura 4.5 Mapa de condutividade hidráulica simulado no SCBR.

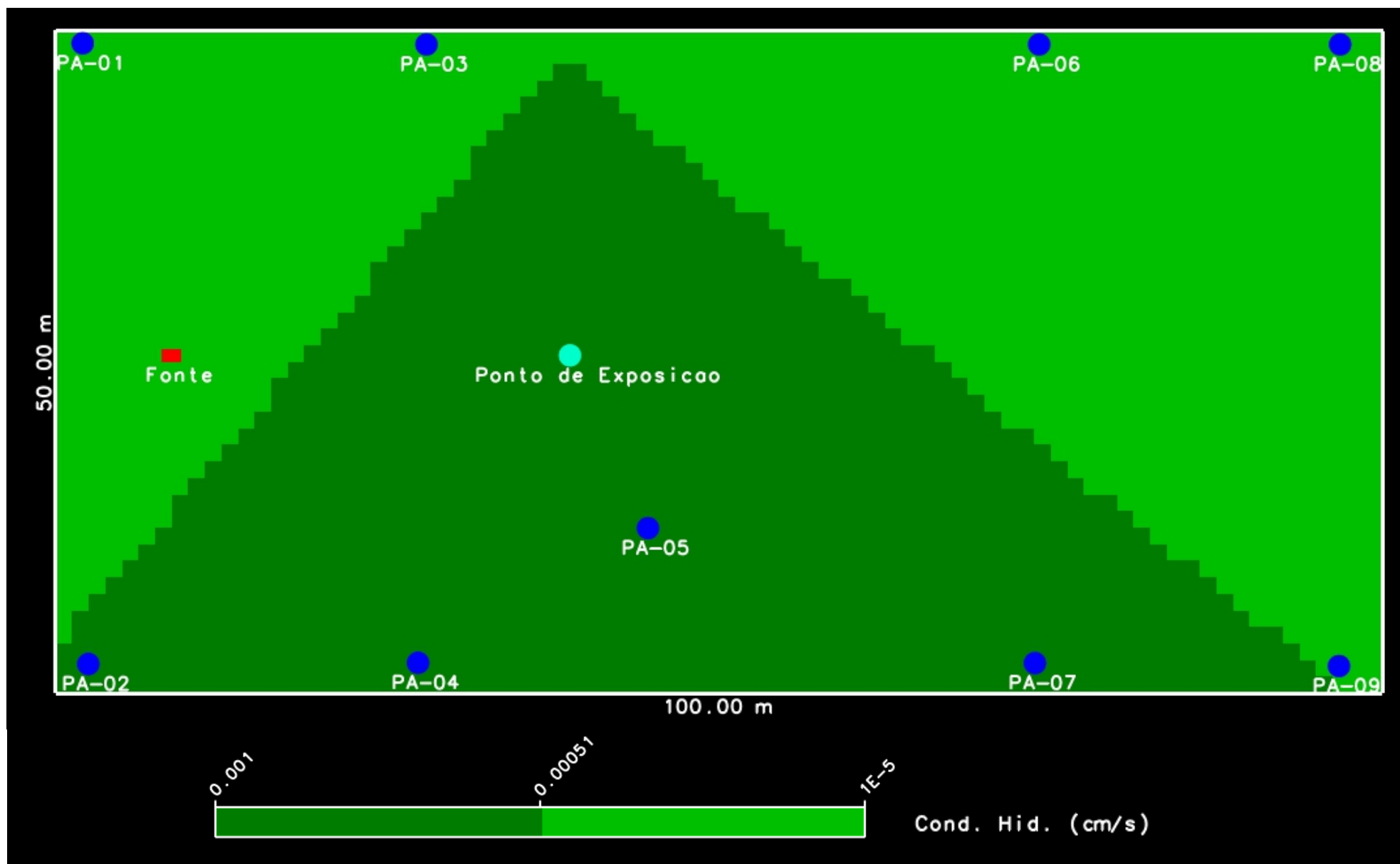
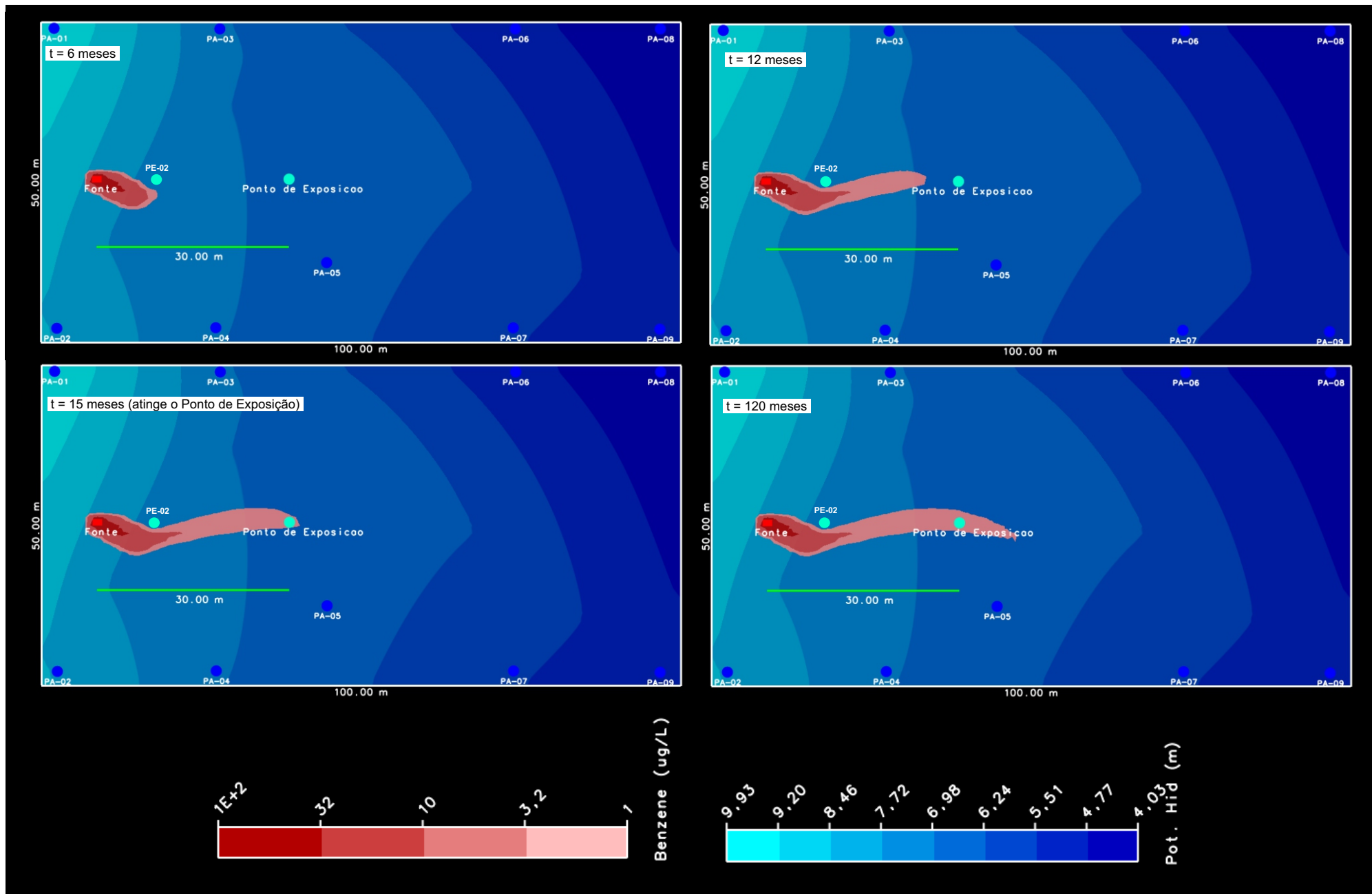


Figura 4.6 Evolução da pluma de Benzeno em fase dissolvida no fluxo subterrâneo.



### 4.3.2 Avaliação da concentração de exposição ao longo do tempo de simulação

A partir das simulações da pluma de Benzeno no fluxo subterrâneo com os modelos SCBR e RISC 4, foram gerados os gráficos de variação da concentração de Benzeno no ponto de exposição, localizado a 30 metros de distância da fonte de contaminação (Figura 4.7 e Figura 4.8).

A concentração de Benzeno no ponto de exposição, no modelo SCBR, é nula até 10 meses de simulação, quando a pluma alcança o ponto de exposição. Entre 10 e 20 meses de simulação, ocorre o aumento gradativo da concentração de Benzeno no ponto de exposição. Neste intervalo de tempo ( $t = 15$  meses), conforme salientado anteriormente, a concentração de Benzeno ultrapassa o padrão de potabilidade do Benzeno estabelecido pela Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde ( $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Com 20 meses de simulação é atingida a máxima concentração de Benzeno no ponto de exposição,  $6,8 \mu\text{g.L}^{-1}$ , permanecendo este valor até o final do tempo de simulação ( $t = 120$  meses) (Figura 4.7).

Para o tempo de simulação inicialmente estabelecido (10 anos), foi observado que a pluma de Benzeno simulada no RISC 4, não atinge o ponto de exposição (Figura 4.8). Desta maneira, uma nova simulação foi realizada com o Modelo RISC 4 para um tempo de simulação de 50 anos (Figura 4.9).

Para o tempo de simulação de 50 anos, a concentração de Benzeno no ponto de exposição, no modelo RISC 4, é nula até aproximadamente 17,5 anos de simulação ( $t = 210$  meses), quando a pluma alcança o ponto de exposição. Entre 17,5 e 25 anos de simulação, ocorre o aumento gradativo da concentração de Benzeno no ponto de exposição, onde a partir de 25 anos ( $t = 300$  meses), é atingida a máxima concentração de Benzeno, aproximadamente  $8,5 \times 10^{-5} \mu\text{g.L}^{-1}$ , permanecendo este valor até o final do tempo de simulação ( $t = 600$  meses) (Figura 4.9).

A partir da comparação dos gráficos de variação da concentração de Benzeno no ponto de exposição, gerados pelos modelos RISC4 e SCBR, observa-se que, mesmo para um tempo de simulação 5 vezes superior ao inicialmente estabelecido, as concentrações de Benzeno observadas no ponto de exposição, no modelo RISC 4, são 100.000 inferiores as observadas no modelo SCBR.

A diferença verificada entre os modelos, na concentração de Benzeno no ponto de exposição, está relacionada aos valores de condutividade hidráulica estabelecidos nas simulações. O valor de condutividade hidráulica estabelecido para o modelo RISC 4,  $2,70 \times 10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup> é inferior a condutividade hidráulica simulada no SCBR, na área do domínio de simulação entre a fonte de contaminação e o ponto de exposição (Figura 4.5). Deste modo, a velocidade de migração da pluma no fluxo subterrâneo é menor no modelo RISC 4 e conseqüentemente a degradação do contaminante ocorrerá durante mais tempo, até o alcance da pluma do contaminante ao ponto de exposição.

O modelo analítico, RISC 4, possibilita a entrada de somente um valor de condutividade hidráulica para a simulação do transporte e transformação de contaminantes no fluxo subterrâneo (SPENCE e WALDEN, 2001). O valor de condutividade hidráulica utilizado como dado de entrada no RISC 4 é representativo do domínio de simulação do cenário de exposição estabelecido, entretanto não é representativo para a subárea do domínio de simulação, entre a fonte de contaminação e o ponto de exposição, conforme os resultados das simulações com o modelo SCBR demonstraram (Figura 4.5). Ratifica-se, portanto, a importância de modelos bidimensionais, *e.g.* SCBR, na determinação da concentração de exposição, que, por considerarem as heterogeneidades do meio subterrâneo, representam mais fidedignamente os fenômenos de transporte e transformação que ocorrem durante todo o trajeto de migração da pluma de contaminação, desde a fonte até o ponto de exposição.

A importância de modelos bidimensionais na determinação da concentração de exposição também é evidenciada a partir dos resultados obtidos na simulação da pluma de Benzeno no fluxo subterrâneo pelo modelo SCBR (Figura 4.6). O ponto de exposição PE-02, apesar de estar posicionado ao longo do eixo de migração da pluma no fluxo subterrâneo, não é atingido pela pluma, devido às heterogeneidades do meio subterrâneo. Desta forma, como não são observadas concentrações de Benzeno no PE-02, o risco é descaracterizado. A utilização de modelos unidimensionais não prevê este tipo de comportamento no meio subterrâneo, justamente por não preverem a heterogeneidade do meio subterrâneo. Nos modelos unidimensionais como a pluma migra ao longo de um eixo coordenado (SPENCE e WALDEN, 2001; CONNOR *et al.*, 2007) são observadas concentrações de Benzeno ao longo de todos os pontos de exposição localizados neste eixo de migração e conseqüentemente a caracterização do risco.



Figura 4.7. Variação da concentração de Benzeno no ponto de exposição para 10 anos de simulação no SCBR.

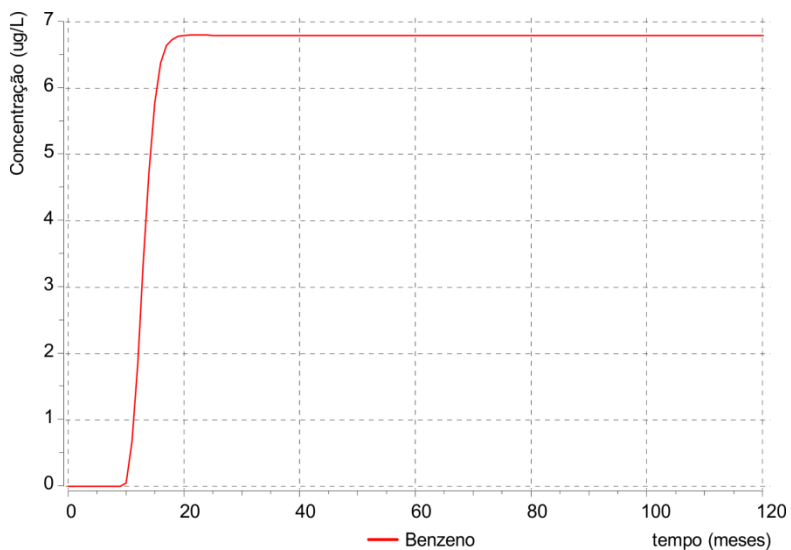


Figura 4.8. Variação da concentração de Benzeno no ponto de exposição para 10 anos de simulação no RISC 4.

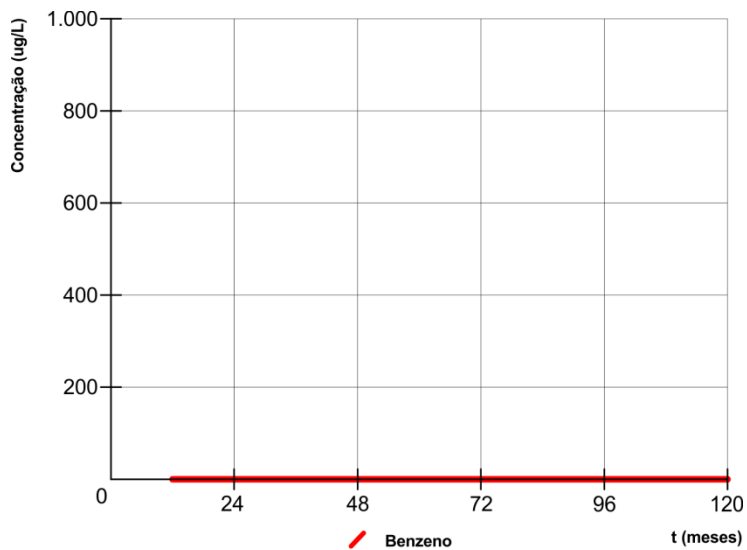
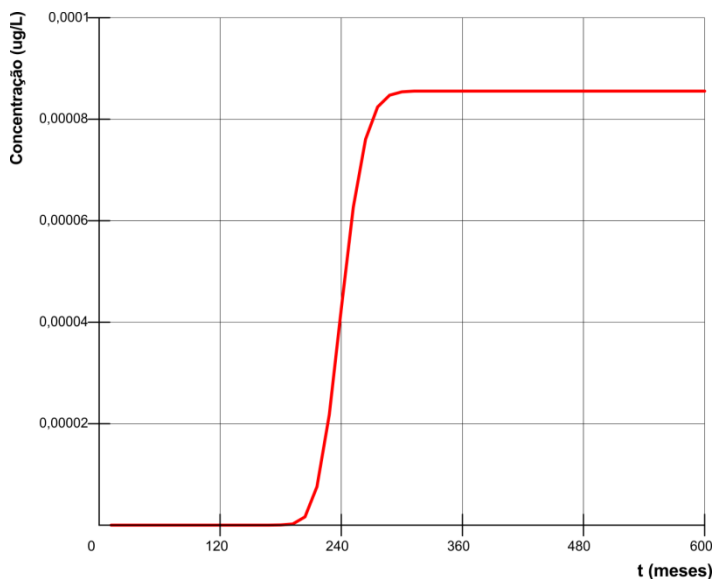


Figura 4.9. Variação da concentração de Benzeno no ponto de exposição para 50 anos de simulação no RISC 4.



#### 4.4 INCERTEZAS DO ESTUDO

Todos os estudos ambientais possuem incertezas as quais podem ser minimizadas a partir do conhecimento e controle das mesmas. As principais fontes de incerteza deste trabalho estão associadas aos seguintes elementos:

- Limitação dos modelos matemáticos quanto à representação fidedigna de todos os fenômenos que ocorrem na natureza, relacionados ao transporte e transformação de contaminantes no meio ambiente;
- Erros aleatórios e sistemáticos desde a coleta de dados em campo por terceiros até a entrada destes dados no modelo matemático.
- Ausência de determinados parâmetros toxicológicos e físico-químicos na literatura;
- A quantificação dos riscos a um determinado receptor exposto a diversos contaminantes não considera possíveis sinergismos ou antagonismos entre os compostos, assumindo que o

metabolismo e o mecanismo de ação dos compostos sejam semelhantes;

- Falta de documentação técnica, tais como, guia do usuário, manual de referências técnicas e referências bibliográficas concisas para as Planilhas da CETESB.

## 5. CONCLUSÕES

Este estudo comparou os modelos matemáticos de avaliação de risco à saúde humana mais frequentemente utilizados no Brasil: RISC 4, RBCA *ToolKit* e Planilhas CETESB. Além disso, também foi utilizado para comparação o modelo SCBR, desenvolvido pela PETROBRAS. Os resultados demonstraram que existem diferenças conceituais e de implementação matemática significativas entre os modelos. Também foram verificadas diferenças no risco e concentrações máximas aceitáveis quantificados a partir do mesmo cenário de contaminação e modelo conceitual de exposição e na concentração de exposição, determinada a partir do mesmo cenário de exposição.

Através da investigação das diferenças conceituais e de implementação matemática dos *softwares* foi possível demonstrar que, dentre os modelos avaliados, as Planilhas CETESB é a que disponibiliza para simulação, a maior variedade de receptores *default* (06) e vias de exposição (16). Ainda, é o único dentre os modelos que distingue receptores residentes em áreas urbanas e rurais e que possui vias de exposição relacionadas ao sedimento contaminado. Entretanto, diferentemente do RISC 4 e RBCA *ToolKit*, não permite ao analista a modificação dos parâmetros de exposição dos receptores, parâmetros do banco de dados dos contaminantes, bem como alguns parâmetros do ambiente, conforme Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E da CETESB. No caso do SCBR, os diferenciais do modelo em relação aos outros modelos de ARSH avaliados são: considerar as heterogeneidades do meio subterrâneo durante a quantificação do risco a partir de concentrações simuladas, considerar a influência do etanol sobre o transporte e a transformação de plumas de hidrocarbonetos de petróleo e possibilitar ao usuário a criação de mapas de risco para a área de interesse.

A quantificação do risco no Cenário A - no qual, foram considerados como dados entrada *default* dos modelos os parâmetros físico-químicos e toxicológicos dos CQI e os parâmetros de exposição dos receptores - demonstrou que existem diferenças significativas, superiores a uma ordem de grandeza, no Risco Total calculado entre os modelos. Para receptores Residentes Adultos, o Risco Carcinogênico Total ao Benzeno calculado foi de  $1,51 \times 10^{-2}$  pela Planilha da CETESB,  $5,00 \times 10^{-3}$  para o RBCA *ToolKit* e  $6,11 \times 10^{-4}$  para o RISC 4. As diferenças observadas no risco quantificado estão relacionadas principalmente as diferenças nos valores *default* dos parâmetros que

apresentam maior influência na quantificação do risco, parâmetros estes: taxa de ingestão de solo, taxa de inalação de vapores e fator de carcinogenicidade dos compostos químicos.

A quantificação das concentrações máximas aceitáveis resultantes (CMA) por compartimento ambiental: água subterrânea, solo subsuperficial e solo superficial, no Cenário A, demonstrou que, de modo geral, as Planilhas CETESB apresentam as CMA mais restritivas dentre os modelos avaliados. Para Residentes Adultos a concentração máxima aceitável ao Benzeno, no solo subsuperficial, quantificada pelas Planilhas CETESB, foi de  $0,007 \text{ mg.kg}^{-1}$ , enquanto que para os modelos RISC 4 e RBCA *ToolKit* foram  $0,180 \text{ mg.kg}^{-1}$  e  $0,020 \text{ mg.kg}^{-1}$ , respectivamente. Análogo aos resultados do Risco Carcinogênico Total ao Benzeno, as diferenças observadas na CMA estão relacionadas principalmente as diferenças nos valores *default* dos parâmetros que apresentam maior influência na quantificação do risco, em especial ao fator de carcinogenicidade.

Os resultados da análise comparativa entre os Cenários A e B verificou que o risco carcinogênico ao Benzeno, quantificado pelos modelos RBCA *Toolkit* e RISC 4, no Cenário B, para as vias de exposição Ingestão de água subterrânea e Ingestão acidental de solo superficial contaminado são semelhantes,  $2,16 \times 10^{-6}$  e  $1,30 \times 10^{-7}$ , respectivamente. Considerando que: os parâmetros de exposição dos receptores e o banco de dados do Benzeno são semelhantes para os três modelos no Cenário B, verifica-se, portanto, que os modelos, RBCA *Toolkit* e RISC 4, possuem algoritmos equivalentes para a quantificação do risco para as vias de exposição de quantificação direta (Ingestão de água subterrânea contaminada e Ingestão acidental de solo superficial contaminado).

A simulação do transporte e transformação da pluma de Benzeno no fluxo subterrâneo, nos modelos RISC 4 e SCBR, e determinação da concentração em um ponto de exposição afastado 30m da fonte de contaminação, verificou que, mesmo para um tempo de simulação 5 vezes superior ao inicialmente estabelecido ( $t = 10$  anos), a maior concentração de Benzeno observada no ponto de exposição no modelo RISC 4 ( $8,5 \times 10^{-5} \mu\text{g.L}^{-1}$ ) é cerca de 100.000 vezes inferior a maior concentração observada no modelo SCBR ( $6,8 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). A diferença no valor de concentração, verificado entre os modelos, está relacionada aos valores de condutividade hidráulica estabelecidos nas simulações. O valor estabelecido no modelo RISC-4 ( $2,70 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ ) é inferior ao valor simulado pelo SCBR no mapa de condutividade hidráulica, na área entre a fonte de contaminação e o ponto de exposição, influenciado,

desta maneira, a velocidade de migração da pluma e tempo de degradação do Benzeno.

As diferenças significativas entre os modelos; obtidas nos resultados de quantificação do risco, concentrações máximas aceitáveis e concentração de exposição; poderão acarretar, em virtude do modelo selecionado pelo analista, em diferentes classificações para a área de interesse de acordo com a Resolução CONAMA nº420/2009 e conseqüentemente mudanças nos procedimentos aplicáveis ao *site*, dentro do processo de gerenciamento ambiental de áreas contaminadas.

De modo a minimizar as diferenças verificadas e qualificar o estudo realizado, cabe ao analista de risco utilizar bancos de dados físico-químicos e toxicológicos dos CQI atualizados e priorizar modelos matemáticos de quantificação do risco que comportem a heterogeneidade do meio subterrâneo. Salienta-se ainda a importância da realização de ensaios, medições e estudos de campo que propiciem o estabelecimento dos parâmetros de exposição e do ambiente específicos do *site* em contrapartida aos valores *default* fornecidos pelos modelos, e usualmente utilizados em projetos de avaliação de risco a saúde humana.

## 6. RECOMENDAÇÕES

Com base nas conclusões obtidas neste trabalho, recomenda-se:

- Investigar com maior profundidade as diferenças nos algoritmos e nas equações implementadas nos modelos avaliados, para as vias de exposição de quantificação indireta do risco;
- Avaliar a influência, na quantificação do risco, no *RBCA ToolKit*, dos modelos de lixiviação e de volatilização de vapores para ambientes abertos e fechados, que consideram processos de degradação dos contaminantes;
- Realizar análise de sensibilidade para quantificar a influência dos parâmetros de exposição, banco de dados dos contaminantes e parâmetros do ambiente no cálculo do risco e das CMA para todas as vias de exposição e modelos considerados;

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Avaliação de risco à saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas**: NBR 16209. Rio de Janeiro, 2013.

ASTM - American Society for Testing and Materials E 01739-95 (Reapproved 2010). **Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites**. West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM - American Society for Testing and Materials. E 2081-00. **Standard Guide for Risk-Based Corrective Action**. West Conshohocken, PA, 2000.

BEAR, J.; CHENG, A.H.D. **Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport**. New York: Springer-Verlag, 2010. 860 p. Theory and Applications of Transport in Porous Media: 23 v.

BEAULIEU, M. The **use of risk assessment and risk management in the revitalization of brownfields in North America**: a controlled opening. In: CONTAMINATED SOIL'98, Edinburgh, 1998. Proceedings. London, The Research Center Karlsruhe (FZK), Netherlands Organization for Applied Scientific Research TNO and Scottish Enterprise, 1998, v.1, p. 51-59.

BEDIENT, P. B.; RIFAI, H. S.; NEWELL, C. J. **Ground Water Contamination: transport and remediation**. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999. 604p.

BRASIL. **Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 1981.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n. 2.914, de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2011.



CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 2 ed. São Paulo: CETESB, 2001, 612p.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E**. Dispõe sobre o procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo. 22 de junho de 2007.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**: dezembro de 2013. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacoes-de-areas-contaminadas/15-publicacoes>. Acesso em: 15 de junho de 2014. 2014a.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Planilhas para avaliação de risco em áreas contaminadas sob investigação**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/planilhas-para-avaliacao-de-risco/8-planilhas>. Acesso em: 10 de junho de 2014. 2014b.

CHANG, S.H.; KUO, C.Y.; WANG, J.W.; WANG, K.S. **Comparison of RBCA and CalTOX for setting risk based cleanup levels based on inhalation exposure**. Chemosphere. v.56(4), p.359-367, 2004.

CHEN, Y.C.; MA, H.W. **Model comparison for risk assessment: A case study of contaminated groundwater**. Chemosphere. v.63, p.751-761, 2006.

COLONESE, B. L. **Aplicação do modelo SCBR no gerenciamento de áreas contaminadas - estudo de caso: terminal de petróleo de São Sebastião**. Florianópolis. 2010. 143p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº. 396, de 03 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente. Governo do Brasil, 2008. 11p.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº. 420, de 28 de dezembro de 2009.** Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Ministério do Meio Ambiente. Governo do Brasil, 2009. 16p.

CONNOR, J.A.; BOWERS, R. L.; McHUGH, T. E.; SPEXET, A. H. **RBCA ToolKit for Chemical Releases: Software Guidance Manual.** GSI Environmental Inc. Verso 2. Houston, Texas, 2007, 120p.

CORSEUIL, H. X.; SCHNEIDER, M. R.; ROSÁRIO, M.; MALISKA JR, M. **Solução Corretiva Baseada no Risco (SCBR): Modelo matemático de tomada de decisão para o gerenciamento ambiental de águas subterrâneas contaminadas.** In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 14, 2006, Curitiba. Anais do 14º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2006.

COUTO, M.L.T. **Atualização dos fatores de exposição e sua influência nos valores de intervenção para solo do estado de São Paulo.** Campinas. 2006. 225p. Dissertação de Mestrado em Geociências – Universidade Estadual de Campinas.

GUIMARÃES, C.H.D. **Avaliação de risco ambiental de sítios contaminados por hidrocarbonetos de petróleo.** Rio de Janeiro. 2003. 315p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

JOUSSEF, K.L. **Influência da taxa de dose potencial variável em áreas contaminadas no cálculo de risco à saúde humana.** Florianópolis. 2013. 109p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina.

MACKAY, D.M.; ROBERTS, P.V.; CHERRY, J.A. **Transport of Organic Contaminants in Groundwater.** Environmental Science and Technology, v. 19, n. 5, p. 384-392, 1985

MCHUGH, T.E., CONNOR, J.A., AHMAD, F., NEWELL, C.J. **A Groundwater Mass Flux Model for Groundwater to Indoor Air Vapor Intrusion, In Situ and On-Site Bioremediation**. Proceedings of the Seventh International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium. Orlando. June, 2003.

MINISTRY OF VROM, 2009. Dutch Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment. **Soil Remediation Circular**. 2009.

NEWELL, C.J., MCLEOD, R.K., GONZALES, J.R. **BIOSCREEN Natural Attenuation Decision Support System User's Manual Version 1.3**. Air Force Center for Environmental Excellence (AFCEE). Brooks AFB. Texas. 1996.

PEDROZO, M.F.M.; BARBOSA, E.M.; CORSEUIL, H.X.; SCHNEIDER, M.R.; LINHARES, M.M. **Ecotoxicologia e avaliação de risco do petróleo**. Salvador: Centro de Recursos Ambientais, 2002. 246 p. Cadernos de referência ambiental: 12 v.

PINEDO, J.; IBÁÑEZ, R.; IRABIEN, A. **A comparison of models for assessing human risks of petroleum hydrocarbons in polluted soils**. Environmental Modeling & Software.v.55, p.61-69, 2014.

RIKKEN M.G.J.; LIJZEN J.P.A. **Update of Risk Assessment Models for the Indirect Human Exposure**. RIVM. Report 601516011/2004. 2004. 53 p.

SCHNEIDER, M.R. **Intemperismo de Fontes de Contaminação em Aquíferos Impactados por Derramamentos de Gasolina e Álcool e a Influência sobre o Risco à Saúde Humana**. Florianópolis. 2005. 176p. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina.

SHARMA, H.D.; REDDY, K.R. **Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies**. New Jersey: John Wiley and Sons, 2004. 992 p.

SPENCE, L.R.; WALDEN, T. **RISC4 - Risk-Integrated Software for Clean-Ups. User's Manual**. BP Oil International. USA, 2001, 463p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC.  
**SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco: Manual de Referências Técnicas.** Versão 3.1. Florianópolis: 2013. 108p.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. EPA/540/1-89/002.**Risk Assessment Guidance for Superfund - Vol. 1: Human Health Evaluation Manual (Part A).**Washington D.C., 1989.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. EPA/540/R-95/128. **Soil Screening Guidance: Technical Background Document.** Washington D.C., May 1996.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. U.S. EPA, **Toxicity and Exposure Assessments for Children’s Health –TEACH Chemical Summary.** 2009. Disponível em: [http://www.epa.gov/teach/chem\\_summ/BENZ\\_summary.pdf](http://www.epa.gov/teach/chem_summ/BENZ_summary.pdf). Acesso em: 03 de setembro de 2014.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Regional Screening Levels (RSL) for chemical contaminants at Superfund sites.** Regional Screening Level (RSL) summary table (TR=1 x 10<sup>-6</sup>, HQ=1) May 2014. Disponível em: <http://www.epa.gov/region9/superfund/prg/>. Acesso em: 12 de junho de 2014.

WIEDEMEIER, T.H.; WILSON, J.T.; KAMPBELL, D.H.; MILLER, R.N.; HANSEN, J.E. **Technical Protocol for Implementing Intrinsic Remediation with Long-Term Monitoring for Natural Attenuation of Fuel Contamination Dissolved in Groundwater.** Vol. I. Air Force Center for Environmental Excellence, Brooks Air Force Base, Texas, 1999a.

WIEDEMEIER, T.H.; RIFAI, H.S.; NEWELL, C.J., WILSON, J.T. **Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface.** New York: John Wiley and Sons, Inc. 1999b. 617p.

XAVIER, L.L; LOUREIRO, C.O. **Análise de Risco Ambiental em Cenários de Contaminação do Solo: Uma Avaliação Metodológica Comparativa.** In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 13, 2004, Cuiabá. Anais do 13º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2004.

**APÊNDICE: Planilhas com os resultados das simulações dos cenários comparativos.**

## **Cenário A**

Apresenta os resultados de quantificação do risco carcinogênico, índice de perigo e concentrações máximas aceitáveis no Cenário A com todos os modelos avaliados, discretizados por composto químico de interesse e por receptor.

## Risco carcinogênico para receptores residentes adultos no Cenário A.

Residentes adultos											
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado		
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	
Softwares / CQI											
<b>RBCA ToolKit</b>	2,60E-06	-	5,80E-09	-	4,90E-08	-	4,30E-07	-	<b>9,60E-05</b>	-	
<b>RISC 4</b>	5,10E-06	-	8,30E-12	-	6,50E-08	-	<b>4,50E-05</b>	-	<b>5,60E-04</b>	-	
<b>Planilhas CETESB</b>	9,42E-06	-	4,36E-09	-	5,45E-07	-	1,60E-06	-	<b>3,23E-04</b>	-	

## Risco carcinogênico para receptores residentes adultos no Cenário A (continuação).

<sup>22</sup> Residentes adultos									
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total		
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	
Softwares / CQI									
<b>RBCA ToolKit</b>	8,80E-08	-	-	-	<b>4,90E-03</b>	-	<b>5,00E-03</b>	-	
<b>RISC 4</b>	1,70E-07	-	2,00E-07	-	N.C	N.C	<b>6,11E-04</b>	-	
<b>Planilhas CETESB</b>	3,14E-07	-	-	-	<b>1,48E-02</b>	-	<b>1,51E-02</b>	-	

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplado pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em vermelho indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido.



## Risco carcinogênico para receptores residentes crianças no Cenário A.

Residentes crianças											
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado		
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	
<b>Softwares / CQI</b>											
<b>RBCA ToolKit</b>	1,20E-06	-	1,20E-09	-	9,80E-09	-	8,60E-08	-	<b>1,90E-05</b>	-	
<b>RISC 4</b>	2,40E-06	-	7,40E-11	-	4,60E-08	-	<b>4,10E-04</b>	-	<b>4,00E-04</b>	-	
<b>Planilhas CETESB</b>	4,39E-06	-	2,65E-09	-	3,32E-07	-	9,68E-07	-	<b>1,97E-04</b>	-	

## Risco carcinogênico para receptores residentes crianças no Cenário A (continuação).

Residentes crianças								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,60E-07	-	-	-	<b>2,30E-03</b>	-	<b>2,32E-03</b>	-
<b>RISC 4</b>	3,20E-07	-	1,30E-07	-	N.C	N.C	<b>8,13E-04</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	5,86E-07	-	-	-	<b>6,92E-03</b>	-	<b>7,12E-03</b>	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplado pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em vermelho indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido.

## Risco carcinogênico para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A.

Trabalhadores de obras civis											
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado		
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	
<b>Softwares / CQI</b>											
<b>RBCA ToolKit</b>	2,30E-08	-	9,90E-11	-	8,40E-10	-	7,30E-09	-	1,60E-06	-	
<b>RISC 4</b>	1,50E-06	-	4,80E-11	-	1,30E-08	-	<b>2,60E-04</b>	-	<b>1,10E-04</b>	-	
<b>Planilhas CETESB</b>	2,60E-07	-	2,41E-10	-	1,60E-08	-	1,32E-06	-	<b>5,57E-05</b>	-	

## Risco carcinogênico para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A (continuação).

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,50E-09	-	-	-	<b>4,20E-05</b>	-	<b>4,36E-05</b>	-
<b>RISC 4</b>	1,00E-07	-	2,70E-07	-	N.C.	N.C.	<b>3,72E-04</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,47E-08	-	-	-	<b>4,10E-04</b>	-	<b>4,67E-04</b>	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplado pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em vermelho indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido.

## Risco carcinogênico para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A.

Trabalhadores comerciais e industriais											
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado		
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	
Softwares / CQI											
<b>RBCA ToolKit</b>	7,90E-07	-	3,40E-09	-	2,90E-08	-	2,60E-07	-	<b>5,70E-05</b>	-	
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	
<b>Planilhas CETESB</b>	3,25E-06	-	3,01E-09	-	1,66E-07	-	1,32E-06	-	<b>1,41E-04</b>	-	

## Risco carcinogênico para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A (continuação).

Trabalhadores comerciais e industriais									
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total		
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	
Softwares / CQI									
<b>RBCA ToolKit</b>	2,60E-08	-	-	-	<b>1,50E-03</b>	-	<b>1,56E-03</b>	-	
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	
<b>Planilhas CETESB</b>	1,08E-07	-	-	-	<b>5,12E-03</b>	-	<b>5,27E-03</b>	-	

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplado pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em vermelho indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido.

Risco não carcinogênico para receptores residentes adultos no Cenário A.

Residentes adultos											
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores fechados a partir do solo subsuperficial impactado		
	Softwares / CQI	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	1,00E-01	-	2,20E-05	-	1,90E-04	-	1,60E-03	-	3,60E-01	-	
<b>RISC 4</b>	-	3,80E-01	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Planilhas CETESB</b>	1,03E-01	3,81E-01	4,47E-05	-	5,59E-03	-	1,64E-02	-	<b>3,31E+00</b>	-	

Risco não carcinogênico para receptores residentes adultos no Cenário A (continuação).

Residentes adultos								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Softwares / CQI	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno
<b>RBCA ToolKit</b>	3,40E-03	-	-	-	<b>1,90E+02</b>	-	<b>1,90E+02</b>	-
<b>RISC 4</b>	-	3,80E-01	-	4,40E-02	N.C	N.C	-	8,04E-01
<b>Planilhas CETESB</b>	3,42E-03	3,81E-01	-	-	<b>1,62E+02</b>	<b>3,14E+00</b>	<b>1,65E+02</b>	<b>3,90E+00</b>

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplado pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho, indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido.

Risco não carcinogênico para receptores residentes crianças no Cenário A.

Residentes crianças											
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado		
	Softwares / CQI	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	2,40E-01	-	2,20E-05	-	1,90E-04	-	1,60E-03	-	3,60E-01	-	
<b>RISC 4</b>	-	8,90E-01	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Planilhas CETESB</b>	2,40E-01	8,88E-01	1,36E-04	-	1,70E-02	-	4,96E-02	-	<b>1,01E+01</b>	-	

Risco não carcinogênico para receptores residentes crianças no Cenário A (continuação).

Residentes crianças									
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total		
	Softwares / CQI	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	3,20E-02	-	-	-	-	<b>4,40E+02</b>	-	<b>4,41E+02</b>	-
<b>RISC 4</b>	-	<b>3,60E+00</b>	-	1,40E-01	N.C	N.C	-	-	<b>4,63E+00</b>
<b>Planilhas CETESB</b>	3,20E-02	<b>3,55E+00</b>	-	-	<b>3,78E+02</b>	<b>7,32E+00</b>	-	<b>3,88E+02</b>	<b>1,18E+01</b>

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho, indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido.

Risco não carcinogênico para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A.

Trabalhadores de obras civis										
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI										
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	-	1,40E-01	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	4,26E-02	1,58E-01	3,71E-05	-	2,46E-03	-	2,03E-01	-	<b>8,57E+00</b>	-

Risco não carcinogênico para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A (continuação).

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	-	2,70E-01	-	7,10E-02	N.C.	N.C.	-	4,81E-01
<b>Planilhas CETESB</b>	5,68E-03	6,31E-01	-	-	<b>6,70E+01</b>	<b>1,30E+00</b>	<b>7,58E+01</b>	<b>2,09E+00</b>

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho, indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido.

Risco não carcinogênico para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A.

Trabalhadores comerciais e industriais											
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado		
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	
Softwares / CQI											
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	4,26E-02	1,58E-01	3,71E-05	-	2,05E-03	-	1,63E-02	-	<b>1,73E+00</b>	-	-

Risco não carcinogênico para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A (continuação).

Trabalhadores comerciais e industriais									
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total		
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	
Softwares / CQI									
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	1,42E-03	1,58E-01	-	-	<b>6,70E+01</b>	<b>1,30E+00</b>	<b>6,88E+01</b>	<b>1,62E+00</b>	

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho, indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido.

## CMA carcinogênica para receptores residentes adultos no Cenário A.

Residentes adultos								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	5,70E-02	-	2,60E+01	-	3,00E+00	-	2,30E+02	-
<b>RISC 4</b>	2,90E-02	-	<b>1,80E+03</b>	-	2,30E+00	-	2,20E+00	-
<b>Planilhas CETESB</b>	1,59E-02	-	3,44E+01	-	2,75E-01	-	6,27E+01	-

## CMA carcinogênica para receptores residentes adultos no Cenário A (continuação).

Residentes adultos								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,00E+00	-	1,10E+03	-	-	-	2,00E-02	-
<b>RISC 4</b>	1,80E-01	-	2,70E+02	-	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	3,09E-01	-	3,19E+02	-	-	-	6,74E-03	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água;



## CMA carcinogênica para receptores residentes crianças no Cenário A.

Residentes crianças								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	1,20E-01	-	1,30E+02	-	1,50E+01	-	>619E+0	-
<b>RISC 4</b>	6,30E-02	-	<b>1,80E+03</b>	-	3,30E+00	-	2,50E-01	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,41E-02	-	5,67E+01	-	4,51E-01	-	1,03E+02	-

## CMA carcinogênica para receptores residentes crianças no Cenário A (continuação).

Residentes crianças								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	5,20E+00	-	6,10E+02	-	-	-	4,40E-02	-
<b>RISC 4</b>	2,50E-01	-	2,20E+02	-	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	5,08E-01	-	1,71E+02	-	-	-	1,44E-02	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água

## CMA carcinogênica para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A.

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	5,70E-01	-	1,30E+03	-	1,80E+02	-	>619E+0	-
<b>RISC 4</b>	9,90E-02	-	<b>1,80E+03</b>	-	1,20E+01	-	3,80E-01	-
<b>Planilhas CETESB</b>	5,77E-01	-	6,22E+02	-	9,39E+00	-	7,56E+01	-

## CMA carcinogênica para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A (continuação).

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	6,10E+01	-	6,60E+04	-	-	-	2,40E+00	-
<b>RISC 4</b>	8,90E-01	-	2,70E+02	-	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	1,80E+00	-	2,88E+03	-	-	-	2,44E-01	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água

## CMA carcinogênica para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A.

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	1,90E-01	-	4,40E+01	-	5,10E+00	-	3,90E+02	-
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	4,61E-02	-	4,98E+01	-	9,01E-01	-	7,56E+01	-

## CMA carcinogênica para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A (continuação).

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	1,80E+00	-	3,80E+03	-	-	-	6,90E-02	-
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	7,10E-01	-	9,23E+02	-	-	-	1,95E-02	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água

CMA carcinogênica resultante para receptores residentes adultos no Cenário A.

Residentes Adultos		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	5,70E-02	2,00E-02	1,10E+03	-	-	-
<b>RISC 4</b>	2,90E-02	1,80E-01	2,70E+02	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	1,59E-02	6,74E-03	3,19E+02	-	-	-

OBS: <sup>1</sup>De forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA carcinogênica resultante para receptores residentes crianças no Cenário A.

Residentes Crianças		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	1,20E-01	4,40E-02	6,10E+02	-	-	-
<b>RISC 4</b>	6,30E-02	2,50E-01	2,20E+02	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,41E-02	1,44E-02	1,71E+02	-	-	-

OBS: <sup>1</sup>De forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA carcinogênica resultante para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A.

Trab. Obras Civis	CMA resultante <sup>1</sup>					
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	5,70E-01	2,40E+00	6,60E+04	-	-	-
<b>RISC 4</b>	9,90E-02	3,80E-01	2,70E+02	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	5,77E-01	2,44E-01	2,88E+03	-	-	-

OBS: <sup>1</sup>De forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA carcinogênica resultante para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A.

Trab. Com/Ind.	CMA resultante <sup>1</sup>					
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	1,90E-01	6,90E-02	3,80E+03	-	-	-
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	4,61E-02	1,95E-02	9,23E+02	-	-	-

OBS: <sup>1</sup>De forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA não carcinogênica para receptores residentes adultos no Cenário A.

Residentes adultos								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,50E-01	-	2,90E+02	-	8,00E+01	-	>619E0	-
<b>RISC 4</b>	-	1,30E-01	-	-	-	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	1,46E-01	1,31E-01	3,35E+02	-	2,68E+00	-	6,11E+02	-

CMA não carcinogênica para receptores residentes adultos no Cenário A (continuação).

Residentes adultos								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	2,80E+01	-	2,90E+03	-	-	-	5,30E-02	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	2,40E+03	-	-	N.C	N.C
<b>Planilhas CETESB</b>	3,02E+00	-	2,92E+03	2,63E+03	-	-	6,18E-02	3,19E+02

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água

## CMA não carcinogênica para receptores residentes crianças no Cenário A.

Residentes crianças								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	6,30E-02	-	6,90E+02	-	8,00E+01	-	>619E0	-
<b>RISC 4</b>	-	5,60E-02	-	-	-	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	6,26E-02	5,63E-02	1,11E+02	-	8,80E-01	-	2,01E+02	-

## CMA não carcinogênica para receptores residentes crianças no Cenário A (continuação).

Residentes crianças								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	2,80E+01	-	3,10E+02	-	-	-	2,30E-02	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	2,70E+02	-	-	N.C	N.C
<b>Planilhas CETESB</b>	9,91E-01	-	3,13E+02	2,82E+02	-	-	2,65E-02	1,37E+02

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água

CMA não carcinogênica para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A.

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	5,70E-01	-	-	-	1,60E+02	-	>619E0	-
<b>RISC 4</b>	-	3,70E-01	-	-	-	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,52E-01	3,17E-01	4,05E+02	-	6,10E+00	-	4,92E+01	-

CMA não carcinogênica para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A (continuação).

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	5,40E+01	-	5,70E+03	-	-	-	2,00E-01	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	2,90E+03	-	-	N.C	N.C
<b>Planilhas CETESB</b>	1,17E+00	-	1,76E+03	1,59E+03	-	-	1,49E-01	7,69E+02

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água.



CMA não carcinogênica para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A.

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	4,10E-01	-	9,60E+02	-	1,10E+02	-	>619E0	-
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	3,52E-01	3,17E-01	4,05E+02	-	7,32E+00	-	6,15E+02	-

CMA não carcinogênica para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A (continuação).

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	3,90E+01	-	8,20E+03	-	-	-	1,50E-01	-
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	5,77E+00	-	7,05E+03	6,34E+03	-	-	1,49E-01	7,69E+02

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água.

CMA não carcinogênica resultante para receptores residentes adultos no Cenário A.

Residentes Adultos		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA Toolkit</b>	1,50E-01	5,30E-02	2,90E+03	-	-	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	1,30E-01	-	2,40E+03
<b>Planilhas CETESB</b>	1,46E-01	6,18E-02	2,92E+03	1,31E-01	3,19E+02	2,63E+03

OBS: <sup>1</sup>de forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA não carcinogênica resultante para receptores residentes crianças no Cenário A.

Residentes Crianças		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA Toolkit</b>	6,30E-02	2,30E-02	3,10E+02	-	-	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	5,60E-02	-	2,70E+02
<b>Planilhas CETESB</b>	6,26E-02	2,65E-02	3,13E+02	5,63E-02	1,37E+02	2,82E+02

OBS: <sup>1</sup>de forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA não carcinogênica resultante para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário A.

Trab. Obras Cívicas		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA Toolkit</b>	5,70E-01	2,00E-01	5,70E+03	-	-	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	3,70E-01	-	2,90E+03
<b>Planilhas CETESB</b>	3,52E-01	1,49E-01	1,76E+03	3,17E-01	7,69E+02	1,59E+03

OBS: <sup>1</sup>de forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA não carcinogênica resultante para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário A.

Trab. Com/Ind		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA Toolkit</b>	4,10E-01	1,50E-01	8,20E+03	0,00E+00	-	-
<b>RISC 4</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	3,52E-01	1,49E-01	7,05E+03	3,17E-01	7,69E+02	6,34E+03

OBS: <sup>1</sup>de forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

## **Cenário B**

Apresenta os resultados de quantificação do risco carcinogênico, índice de perigo e concentrações máximas aceitáveis no Cenário B com todos os modelos avaliados, discretizados por composto químico de interesse e por receptor.

## Risco carcinogênico para receptores residentes adultos no Cenário B.

Residentes adultos										
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>										
<b>RBCA ToolKit</b>	4,70E-06	-	4,10E-06	-	1,30E-07	-	<b>3,00E-04</b>	-	<b>7,00E-02</b>	-
<b>RISC 4</b>	4,70E-06	-	8,00E-11	-	1,00E-07	-	<b>4,10E-04</b>	-	<b>8,30E-04</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	9,42E-06	-	4,36E-09	-	5,45E-07	-	1,60E-06	-	<b>3,23E-04</b>	-

## Risco carcinogênico para receptores residentes adultos no Cenário B (continuação).

Residentes adultos								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,60E-07	-	-	-	<b>8,70E-03</b>	-	<b>7,90E-02</b>	-
<b>RISC 4</b>	1,60E-07	-	-	-	N.C.	N.C.	<b>1,24E-03</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,14E-07	-	-	-	<b>1,48E-02</b>	-	<b>1,51E-02</b>	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em vermelho indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido.

Risco carcinogênico para receptores residentes crianças no Cenário B.

Residentes crianças										
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI										
<b>RBCA ToolKit</b>	2,20E-06	-	8,10E-07	-	6,90E-06	-	<b>5,90E-05</b>	-	<b>1,40E-02</b>	-
<b>RISC 4</b>	2,20E-06	-	4,80E-11	-	6,30E-08	-	<b>2,50E-04</b>	-	<b>5,10E-04</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	4,39E-06	-	2,65E-09	-	3,32E-07	-	9,68E-07	-	<b>1,97E-04</b>	-

Risco carcinogênico para receptores residentes crianças no Cenário B (continuação).

Residentes crianças								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	2,90E-07	-	-	-	<b>4,10E-03</b>	-	<b>1,82E-02</b>	-
<b>RISC 4</b>	2,90E-07	-	-	-	N.C.	N.C.	<b>7,63E-04</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	5,86E-07	-	-	-	<b>6,92E-03</b>	-	<b>7,12E-03</b>	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em vermelho indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido.

## Risco carcinogênico para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B.

Trabalhadores de obras civis										
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>										
<b>RBCA ToolKit</b>	1,30E-07	-	2,20E-07	-	1,90E-06	-	<b>1,60E-05</b>	-	<b>3,90E-03</b>	-
<b>RISC 4</b>	1,30E-07	-	4,40E-12	-	3,60E-09	-	<b>2,20E-05</b>	-	<b>2,90E-05</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	2,60E-07	-	2,41E-10	-	1,60E-08	-	1,32E-06	-	<b>5,57E-05</b>	-

## Risco carcinogênico para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B (continuação).

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,70E-08	-	-	-	<b>2,40E-04</b>	-	<b>4,16E-03</b>	-
<b>RISC 4</b>	1,70E-08	-	-	-	N.C.	N.C.	<b>5,12E-05</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,47E-08	-	-	-	<b>4,10E-04</b>	-	<b>4,67E-04</b>	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em vermelho indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido.

Risco carcinogênico para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B.

Trabalhadores comerciais e industriais										
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI										
<b>RBCA ToolKit</b>	1,60E-06	-	2,80E-06	-	<b>2,40E-05</b>	-	<b>2,10E-04</b>	-	<b>4,90E-02</b>	-
<b>RISC 4</b>	1,60E-06	-	5,50E-11	-	4,50E-08	-	<b>2,80E-04</b>	-	<b>3,60E-04</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,25E-06	-	3,01E-09	-	1,66E-07	-	1,32E-06	-	<b>1,41E-04</b>	-

Risco carcinogênico para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B (continuação).

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	5,40E-08	-	-	-	<b>3,00E-03</b>	-	<b>5,22E-02</b>	-
<b>RISC 4</b>	5,40E-08	-	-	-	N.C.	N.C.	<b>6,42E-04</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	1,08E-07	-	-	-	<b>5,12E-03</b>	-	<b>5,27E-03</b>	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do risco para a via em questão; Resultados em vermelho indicam risco carcinogênico maior que risco alvo carcinogênico estabelecido.



Risco não carcinogênico para receptores residentes adultos no Cenário B.

Residentes adultos										
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>										
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	1,00E-01	3,80E-01	4,10E-07	-	5,20E-04	-	2,10E+00	-	4,20E+00	-
<b>Planilhas CETESB</b>	1,03E-01	3,81E-01	4,47E-05	-	5,59E-03	-	1,64E-02	-	3,31E+00	-

Risco não carcinogênico para receptores residentes adultos no Cenário B (continuação).

Residentes adultos								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	3,40E-03	3,80E-01	-	-	N.C.	N.C.	6,40E+00	7,60E-01
<b>Planilhas CETESB</b>	3,42E-03	3,81E-01	-	-	1,62E+02	3,14E+00	1,65E+02	3,90E+00

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho, indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido.

Risco não carcinogênico para receptores residentes crianças no Cenário B.

Residentes crianças										
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>										
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	2,40E-01	8,90E-01	1,20E-06	-	1,60E-03	-	<b>6,30E+00</b>	-	<b>1,30E+01</b>	-
<b>Planilhas CETESB</b>	2,40E-01	8,88E-01	1,36E-04	-	1,70E-02	-	4,96E-02	-	<b>1,01E+01</b>	-

Risco não carcinogênico para receptores residentes crianças no Cenário B (continuação).

Residentes crianças								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	3,20E-02	<b>3,60E+00</b>	-	-	N.C.	N.C.	<b>1,96E+01</b>	<b>4,49E+00</b>
<b>Planilhas CETESB</b>	3,20E-02	<b>3,55E+00</b>	-	-	<b>3,78E+02</b>	<b>7,32E+00</b>	<b>3,88E+02</b>	<b>1,18E+01</b>

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho, indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido.

Risco não carcinogênico para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B.

Trabalhadores de obras civis										
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	4,30E-02	1,60E-01	3,40E-07	-	2,70E-04	-	1,70E+00	-	2,20E+00	-
<b>Planilhas CETESB</b>	4,26E-02	1,58E-01	3,71E-05	-	2,46E-03	-	2,03E-01	-	8,57E+00	-

Risco não carcinogênico para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B (continuação).

Trabalhadores de obras civis									
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total		
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	
<b>RISC 4</b>	5,70E-03	6,30E-01	-	-	N.C.	N.C.	3,95E+00	7,90E-01	
<b>Planilhas CETESB</b>	5,68E-03	6,31E-01	-	-	6,70E+01	1,30E+00	7,58E+01	2,09E+00	

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho, indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido.

Risco não carcinogênico para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B.

Trabalhadores comerciais e industriais										
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada		Inalação de vapores abertos a partir do solo subsuperficial impactado		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>										
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	4,30E-02	1,60E-01	3,40E-07	-	2,70E-04	-	1,70E+00	-	2,20E+00	-
<b>Planilhas CETESB</b>	4,26E-02	1,58E-01	3,71E-05	-	2,05E-03	-	1,63E-02	-	1,73E+00	-

Risco não carcinogênico para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B (continuação).

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Ingestão acidental de solo superficial impactado		Contato dérmico com solo superficial impactado		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado		Total	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
<b>RISC 4</b>	1,40E-03	1,60E-01	-	-	N.C.	N.C.	3,94E+00	3,20E-01
<b>Planilhas CETESB</b>	1,42E-03	1,58E-01	-	-	6,70E+01	1,30E+00	6,88E+01	1,62E+00

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho, indicam índice de perigo maior que risco alvo não carcinogênico estabelecido.

## CMA carcinogênica para receptores residentes adultos no Cenário B.

Residentes adultos								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	3,20E-02	-	3,70E-02	-	4,30E-03	-	3,40E-01	-
<b>RISC 4</b>	3,20E-02	-	>1,80E+03	-	1,50E+00	-	2,50E-01	-
<b>Planilhas CETESB</b>	1,59E-02	-	3,44E+01	-	2,75E-01	-	6,27E+01	-

## CMA carcinogênica para receptores residentes adultos no Cenário B (continuação).

Residentes adultos								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,40E-03	-	5,40E+02	-	-	-	1,10E-02	-
<b>RISC 4</b>	1,20E-01	-	6,40E+02	-	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	3,09E-01	-	3,19E+02	-	-	-	6,74E-03	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água;

## CMA carcinogênica para receptores residentes crianças no Cenário B.

Residentes crianças								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	6,90E-02	-	1,80E-01	-	2,20E-02	-	1,70E+00	-
<b>RISC 4</b>	6,30E-02	-	>1,80E+03	-	2,40E+00	-	4,00E-01	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,41E-02	-	5,67E+01	-	4,51E-01	-	1,03E+02	-

## CMA carcinogênica para receptores residentes crianças no Cenário B (continuação).

Residentes crianças								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	7,10E-03	-	3,40E+02	-	-	-	2,50E-02	-
<b>RISC 4</b>	2,00E-01	-	3,10E+02	-	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	5,08E-01	-	1,71E+02	-	-	-	1,44E-02	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água

## CMA carcinogênica para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B.

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,20E+00	-	6,70E-01	-	7,80E-02	-	6,10E+00	-
<b>RISC 4</b>	3,60E-01	-	<b>&gt;1,80E+03</b>	-	7,70E-01	-	4,50E+00	-
<b>Planilhas CETESB</b>	5,77E-01	-	6,22E+02	-	9,39E+00	-	7,56E+01	-

## CMA carcinogênica para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B (continuação).

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	2,60E-02	-	<b>5,80E+03</b>	-	-	-	4,20E-01	-
<b>RISC 4</b>	3,4E+00	-	1,80E+03	-	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	1,80E+00	-	2,88E+03	-	-	-	2,44E-01	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água

## CMA carcinogênica para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B.

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	9,30E-02	-	5,30E-02	-	6,30E-03	-	4,90E-01	-
<b>RISC 4</b>	9,30E-02	-	>1,80E+03	-	3,40E+00	-	3,60E-01	-
<b>Planilhas CETESB</b>	4,61E-02	-	4,98E+01	-	9,01E-01	-	7,56E+01	-

## CMA carcinogênica para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B (continuação).

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	2,10E-03	-	1,90E+03	-	-	-	3,30E-02	-
<b>RISC 4</b>	2,80E-01	-	1,90E+03	-	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	7,10E-01	-	9,23E+02	-	-	-	1,95E-02	-

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água



CMA carcinogênica resultante para receptores residentes adultos no Cenário B.

Residentes Adultos		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	4,30E-03	1,40E-03	5,40E+02	-	-	-
<b>RISC 4</b>	3,20E-02	1,20E-01	6,40E+02	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	1,59E-02	6,74E-03	3,19E+02	-	-	-

OBS: <sup>1</sup>De forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA carcinogênica resultante para receptores residentes crianças no Cenário B.

Residentes Crianças		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	2,20E-02	7,10E-03	3,40E+02	-	-	-
<b>RISC 4</b>	6,30E-02	2,00E-01	3,10E+02	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,41E-02	1,44E-02	1,71E+02	-	-	-

OBS: <sup>1</sup>De forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA carcinogênica resultante para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B.

Trab. Obras Civis	CMA resultante <sup>1</sup>					
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	7,80E-02	2,60E-02	5,80E+03	-	-	-
<b>RISC 4</b>	3,60E-01	3,40E+00	1,80E+03	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	5,77E-01	2,44E-01	2,88E+03	-	-	-

OBS: <sup>1</sup>De forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA carcinogênica resultante para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B.

Trab. Com/Ind.	CMA resultante <sup>1</sup>					
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	6,30E-03	2,10E-03	1,90E+03	-	-	-
<b>RISC 4</b>	9,30E-02	2,80E-01	1,90E+03	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	4,61E-02	1,95E-02	9,23E+02	-	-	-

OBS: <sup>1</sup>De forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

## CMA não carcinogênica para receptores residentes adultos no Cenário B.

Residentes adultos								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	3,10E-01	-	3,40E+01	-	4,0E+00	-	3,1E+02	-
<b>RISC 4</b>	-	1,30E-01	-	-	1,50E+00	-	2,50E-01	-
<b>Planilhas CETESB</b>	1,46E-01	1,31E-01	3,35E+02	-	2,68E+00	-	6,11E+02	-

## CMA não carcinogênica para receptores residentes adultos no Cenário B (continuação).

Residentes adultos								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,30E+00	-	6,30E+03	-	-	-	1,10E-01	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	2,40E+00	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	3,02E+00	-	2,92E+03	2,63E+03	-	-	6,18E-02	3,19E+02

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água

## CMA não carcinogênica para receptores residentes crianças no Cenário B.

Residentes crianças								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,30E-01	-	3,40E+01	-	1,50E+01	-	3,10E+02	-
<b>RISC 4</b>	-	5,60E-02	-	-	-	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	6,26E-02	5,63E-02	1,11E+02	-	8,80E-01	-	2,01E+02	-

## CMA não carcinogênica para receptores residentes crianças no Cenário B (continuação).

Residentes crianças								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,30E+00	-	6,70E+02	-	-	-	4,8E-02	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	2,0E+00	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	9,91E-01	-	3,13E+02	2,82E+02	-	-	2,65E-02	1,37E+02

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água

## CMA não carcinogênica para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B.

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	7,60E-01	-	4,10E+01	-	4,80E+00	-	3,70E+02	-
<b>RISC 4</b>	-	3,10E-01	-	-	-	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,52E-01	3,17E-01	4,05E+02	-	6,10E+00	-	4,92E+01	-

## CMA não carcinogênica para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B (continuação).

Trabalhadores de obras civis								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
<b>Softwares / CQI</b>								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,60E+00	-	3,80E+03	-	-	-	2,70E-01	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	6,50E+01	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	1,17E+00	-	1,76E+03	1,59E+03	-	-	1,49E-01	7,69E+02

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água.

CMA não carcinogênica para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B.

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Ingestão de água subterrânea contaminada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes fechados a partir da água subterrânea impactada (mg/L)		Inalação de vapores em ambientes abertos a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	7,60E-01	-	4,10E+01	-	4,80E+00	-	3,70E+02	-
<b>RISC 4</b>	-	3,10E-01	-	-	-	-	-	-
<b>Planilhas CETESB</b>	3,52E-01	3,17E-01	4,05E+02	-	7,32E+00	-	6,15E+02	-

CMA não carcinogênica para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B (continuação).

Trabalhadores comerciais e industriais								
Vias de exposição	Inalação de vapores em ambientes fechados a partir do solo subsuperficial impactado (mg/kg)		Ingestão acidental de solo superficial impactado (mg/kg)		Contato dérmico com solo superficial impactado (mg/kg)		Ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo subsuperficial impactado (mg/kg)	
	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo	Benzeno	Chumbo
Softwares / CQI								
<b>RBCA ToolKit</b>	1,60E+00	-	1,50E+04	-	-	-	2,70E-01	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	5,20E+00	-	-	N.C.	N.C.
<b>Planilhas CETESB</b>	5,77E+00	-	7,05E+03	6,34E+03	-	-	1,49E-01	7,69E+02

OBS: "N.C." Via de exposição e/ou receptor não contemplados pelo software; "-" Banco de dados do software, não apresenta, para o composto químico em questão, parâmetro necessário para a quantificação do índice de perigo para a via em questão; Resultados em vermelho indicam CMA maior que a solubilidade do composto em água.

CMA não carcinogênica resultante para receptores residentes adultos no Cenário B.

Residentes Adultos		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	3,10E-01	1,10E-01	6,30E+03	-	-	-
<b>RISC 4</b>	1,50E+00	2,50E-01	-	1,30E-01	-	2,40E+00
<b>Planilhas CETESB</b>	1,46E-01	6,18E-02	2,92E+03	1,31E-01	3,19E+02	2,63E+03

OBS: <sup>1</sup>de forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA não carcinogênica resultante para receptores residentes crianças no Cenário B.

Residentes Crianças		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	1,30E-01	4,80E-02	6,70E+02	-	-	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	5,60E-02	-	2,00E+00
<b>Planilhas CETESB</b>	6,26E-02	2,65E-02	3,13E+02	5,63E-02	1,37E+02	2,82E+02

OBS: <sup>1</sup>de forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA não carcinogênica resultante para receptores trabalhadores de obras civis no Cenário B.

Trab. Obras Civis		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	7,60E-01	2,70E-01	3,80E+03	-	-	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	3,10E-01	-	6,50E+01
<b>Planilhas CETESB</b>	3,52E-01	1,49E-01	1,76E+03	3,17E-01	7,69E+02	1,59E+03

OBS: <sup>1</sup>de forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.

CMA não carcinogênica resultante para receptores trabalhadores comerciais e industriais no Cenário B.

Trab. Com/Ind		CMA resultante <sup>1</sup>				
Vias de exposição	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)	Água subterrânea (mg/L)	Solo subsuperficial (mg/kg)	Solo superficial (mg/kg)
Softwares / CQI	Benzeno			Chumbo		
<b>RBCA ToolKit</b>	7,60E-01	2,70E-01	1,50E+04	-	-	-
<b>RISC 4</b>	-	-	-	3,10E-01	-	5,20E+00
<b>Planilhas CETESB</b>	3,52E-01	1,49E-01	7,05E+03	3,17E-01	7,69E+02	6,34E+03

OBS: <sup>1</sup>de forma conservadora, valor mais restritivo para o compartimento ambiental em questão.