

## APLICAÇÃO DO MODELO SCBR NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS–ESTUDO DE CASO: TERMINAL DE PETRÓLEO DE SÃO SEBASTIÃO

**Bruno Leonardo Colonese** – colonese@ens.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
Av. Professor Othon Gama D’Eça, 627/apto. 710 - Centro  
CEP 88015-240 – Florianópolis – SC

**Henry Xavier Corseuil** – corseuil@ens.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

**Cristina Cardoso Nunes** – crisnunes@ens.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

**Resumo:** A importância das águas subterrâneas como uma das principais fontes de suprimento de água potável justifica a preocupação com a preservação dos aquíferos e a busca de alternativas para minimização de impactos causados por empreendimentos potencialmente poluidores. O gerenciamento de áreas contaminadas é composto por uma sequência lógica de procedimentos e decisões a serem tomadas, desde a suspeita da contaminação até a definição de estratégias de gerenciamento do risco. A customização de um modelo computacional de transporte e transformação de contaminantes na água subterrânea para uma área potencialmente contaminada, antes do evento de contaminação, pode ter grande contribuição para acelerar o processo decisório e mitigatório, no caso de ocorrência do impacto ambiental. O SCBR (Solução Corretiva Baseada no Risco) é um modelo computacional bidimensional para simulação do transporte e transformação de poluentes e avaliação de risco para as rotas solo, água e ar. O objetivo deste trabalho foi aplicar o modelo SCBR a áreas potencialmente contaminadas, na fase de customização e na elaboração de possíveis cenários de risco e suas correspondentes medidas emergenciais. As seguintes vantagens foram observadas na conclusão deste estudo: possibilidade de ganho de tempo e eficiência na minimização de impactos, facilitando o diálogo com o órgão ambiental.

**Palavras-chave:** Gerenciamento ambiental, SCBR, Terminal de petróleo

## APPLICATION OF SCBR MODEL IN THE CONTAMINATED AREAS MANAGEMENT–CASE STUDY: PETROLEUM TERMINAL OF SÃO SEBASTIÃO

**Abstract:** The importance of the groundwater as one of the main sources of drinking water supply justifies the concern about the preservation of the aquifers and the search of alternatives for minimization of impacts caused by enterprises potentially pollutant. The contaminated areas management is compound by a logical sequence of procedures and decisions to be made, from the suspicion of the contamination to the definition of risk management strategies. The customization of a contaminant transport and fate computational model in the groundwater to an area potentially contaminated, before the contamination event, can have great contribution to accelerate the decisory

*and mitigatory process, if the environmental impact happens. SCBR (“Solução Corretiva Baseada no Risco”) is a two-dimensional computational model to simulate transport and fate of contaminants and to do risk assessment for the pathways soil, water and air. The objective of this work was to apply SCBR model to areas potentially contaminated, in the phase of customization and in the elaboration of possible risk sceneries and emergencial strategies. The following advantages were observed on the conclusion of this study: possibility of gain of time and efficiency in the minimization of impacts, facilitating the discussion with the environmental regulatory agency.*

**Keywords:** Environmental management, SCBR, Petroleum terminal

## 1. INTRODUÇÃO

A contaminação do solo e das águas subterrâneas por derramamentos de petróleo e derivados é um problema de grande importância em todo o mundo, em função do crescente diagnóstico de áreas impactadas ao longo dos anos. A possibilidade de ocorrência destes acidentes está relacionada às atividades de exploração, armazenamento e transporte de petróleo e derivados nos terminais, sendo a maioria dos derramamentos originada nos dutos, tanques de armazenamento e postos de combustíveis (CETESB, 2001).

A importância das águas subterrâneas como uma das principais fontes de suprimento de água potável justifica a preocupação com a preservação dos aquíferos e a busca de alternativas para minimização de impactos causados por empreendimentos potencialmente poluidores. Na ocorrência de derramamentos de combustíveis como a gasolina, esta se solubilizará parcialmente em contato com a água subterrânea, liberando compostos como os hidrocarbonetos monoaromáticos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), que são reconhecidos como cancerígenos aos seres humanos. Esses compostos são os constituintes da gasolina que possuem maior mobilidade e toxicidade no meio ambiente e, portanto, são os contaminantes de maior importância em uma avaliação de risco ambiental (WIEDEMEIER et al., 1999).

O processo de gerenciamento de áreas impactadas requer profundo entendimento das condições subsuperficiais e hidrogeológicas e a natureza da contaminação. Isto é necessário para uma correta avaliação do risco que esse impacto pode trazer ao local e à população e, assim, realizar a aplicação de tecnologias de remediação adequadas. No Brasil ainda não existe uma metodologia nacional destinada ao gerenciamento de áreas impactadas, sendo a metodologia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) a referência brasileira nessa área. Com o objetivo de otimizar recursos técnicos e econômicos, a metodologia tem uma estrutura sequencial, de modo que a informação obtida em cada etapa é a base para a execução da etapa posterior. É constituída por dois processos básicos, a identificação das áreas contaminadas e a posterior recuperação destas áreas (CETESB, 2001).

Para prever os riscos de contaminação das águas subterrâneas e para definição de estratégias de recuperação de áreas já contaminadas, a modelagem computacional do transporte e transformação de poluentes tem sido utilizada como uma importante ferramenta de auxílio à tomada de decisão no gerenciamento ambiental de áreas impactadas (SCHNOOR, 1996; MANDLE, 2002). Desta forma, um modelo computacional customizado para áreas potencialmente contaminadas, antes da ocorrência de eventos de contaminação, pode contribuir com a tomada decisão em casos de vazamentos e, então, agilizar as medidas emergenciais e a minimização dos riscos aos potenciais receptores. Apesar da variedade de modelos computacionais disponíveis no mercado, existem fenômenos de contaminação das águas subterrâneas que não são simulados nesses modelos disponíveis, como, por exemplo, o caso de derramamento de gasolina comercial brasileira em postos de serviço, cuja composição recebe a adição de etanol.

Mais de dez anos de estudos de campo e de laboratório, realizados pela Universidade Federal de Santa Catarina, têm demonstrado que a presença do etanol em derramamentos de gasolina pode afetar significativamente o comportamento dos hidrocarbonetos de petróleo em sistemas subsuperficiais (CORSEUIL & FERNANDES, 2000). Os resultados obtidos nos experimentos de

campo motivaram o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de fácil utilização, que simulasse o transporte e a transformação de contaminantes em águas subterrâneas, e que atendesse as especificidades de cenários de contaminação, por gasolina com etanol, encontrados no Brasil: o modelo computacional SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco.

O objetivo deste trabalho foi aplicar o modelo SCBR a áreas potencialmente contaminadas, na fase de customização (antes do evento da contaminação) e na suposição de ocorrência de impactos ambientais, apresentando possíveis cenários de risco (após a contaminação) e suas correspondentes medidas emergenciais. Para isto, foi realizado um estudo de caso no Terminal de Petróleo de São Sebastião (SP).

## 2. GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Uma área contaminada pode ser definida como uma área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação, causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural. Os poluentes podem se localizar na zona não saturada (solo e/ou ar) ou saturada (água subterrânea), além de poderem concentrar-se nas paredes, nos pisos e nas estruturas de construções. Os poluentes ou contaminantes podem ser transportados a partir desses meios, propagando-se por diferentes vias, como, por exemplo, o ar, o próprio solo, as águas subterrâneas e superficiais, alterando suas características naturais ou qualidades e determinando impactos negativos e/ou riscos sobre os bens a proteger, localizados na própria área ou em seus arredores (CETESB, 2001).

O gerenciamento de áreas contaminadas é composto por uma sequência lógica de procedimentos e decisões a serem tomadas, desde a suspeita da contaminação até a definição de estratégias de gerenciamento do risco. Dentro de um processo decisório, o gerenciamento de áreas contaminadas vem sendo utilizado como uma ferramenta científica de tomada de decisões que prioriza os locais a serem remediados com base no risco que cada área representa à saúde pública e ao meio ambiente (CETESB, 2001). Conforme descrito no Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB, a metodologia de gerenciamento é composta pelas duas fases a seguir.

### 2.1. Processo de Identificação de Áreas Contaminadas

O objetivo principal é o mapeamento e a localização das áreas contaminadas. É composto por quatro etapas: Definição da Região de Interesse, Identificação das Áreas Potencialmente Contaminadas, Avaliação Preliminar e Investigação Confirmatória.

Na Definição da Região de Interesse, são estabelecidos os limites da região a serem abrangidos pelo gerenciamento e estabelecidos os objetivos principais a serem alcançados por este, considerando os principais bens a proteger. Na etapa de Identificação das Áreas Potencialmente Contaminadas, são identificadas, na região de interesse, as áreas onde são ou foram manipuladas substâncias cujas características físico-químicas, biológicas e toxicológicas possam causar danos ou colocar em risco os bens a proteger. A Avaliação Preliminar consiste na elaboração de um diagnóstico inicial das áreas potencialmente contaminadas, identificadas na etapa anterior, o que será possível realizando-se um levantamento de informações existentes e de informações coletadas em inspeções de reconhecimento em cada uma dessas áreas, através de um estudo histórico das atividades desenvolvidas na área e levantamento de dados sobre o meio físico. Encerrando esta fase, a Investigação Confirmatória tem como objetivo confirmar ou não a contaminação nas áreas suspeitas. Isto deve ser feito por amostragem e análise hidrogeoquímica e comparação das concentrações com valores orientadores. Caso se confirme a contaminação, as áreas deverão ser incluídas no Processo de Recuperação (CETESB, 2001).

## 2.2. Processo de Recuperação de Áreas Contaminadas

Esta fase tem por objetivo principal a determinação e execução das medidas corretivas mais apropriadas para essas áreas, possibilitando sua recuperação para um uso compatível com as metas estabelecidas. Este segundo processo é composto por seis etapas: Investigação Detalhada, Avaliação de Risco, Investigação para Remediação, Projeto de Remediação, Remediação das Áreas Contaminadas e Monitoramento.

A Investigação Detalhada subsidia a execução da avaliação de risco e, conseqüentemente, para a definição das intervenções necessárias na área contaminada. Tem execução semelhante à investigação confirmatória, porém, com o objetivo principal de quantificar a contaminação, caracterizando a fonte de contaminação, os meios afetados e a pluma de contaminação. Na Avaliação de Risco é feita a quantificação dos riscos gerados pelas áreas contaminadas aos bens a proteger. É baseada em princípios de toxicologia, química e no conhecimento sobre o comportamento e transporte dos contaminantes nas rotas de exposição, permitindo determinar a necessidade de remediação em função da condição de uso e ocupação do solo no local e imediações. A Investigação para Remediação serve para selecionar, dentre as várias opções de técnicas existentes, aquelas, ou a combinação destas, que são possíveis, apropriadas e legalmente permissíveis para o caso considerado, com base nos objetivos definidos na avaliação de risco. O Projeto de Remediação deve ser confeccionado, para ser utilizado como a base técnica para o órgão gerenciador ou órgão de controle ambiental avaliar a possibilidade de autorizar ou não a implantação e operação dos sistemas de remediação propostos. A Remediação das Áreas Contaminadas consiste na implementação de medidas que resultem no saneamento da área contaminada e/ou na contenção e isolamento dos contaminantes. Durante as ações de remediação, a área deve permanecer sob contínuo Monitoramento, por período de tempo a ser definido pelo órgão de controle ambiental, para que se possa verificar a eficiência da remediação (CETESB, 2001).

## 3. SOLUÇÃO CORRETIVA BASEADA NO RISCO (SCBR)

O SCBR é resultado da parceria entre a PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através do Laboratório de Remediação de Águas Subterrâneas (REMAS), com a colaboração da ESSS (“Engineering Simulation and Scientific Software”). O SCBR é um modelo computacional bidimensional para simulação do transporte e transformação de poluentes e avaliação de risco para as rotas solo, água e ar, desenvolvido para auxiliar a tomada de decisão no gerenciamento ambiental de áreas impactadas ou em áreas onde são desenvolvidas atividades potencialmente poluidoras (SCBR - GUIA DO USUÁRIO, 2008). O modelo permite a determinação do fluxo da água subterrânea; a estimativa do alcance e da velocidade de migração de plumas de contaminação; a definição de perímetros de proteção de aquíferos; o cálculo das taxas de volatilização e percolação dos contaminantes; a simulação da aplicação de diversas tecnologias de remediação, contemplando a heterogeneidade do aquífero; o cálculo e o mapeamento do risco à saúde humana, considerando diversas rotas de exposição; e a geração de relatórios e animações, contendo os parâmetros do estudo. No caso de contaminações por derramamentos de combustíveis brasileiros, onde existe a adição de álcool, o modelo SCBR considera a interferência do etanol sobre a biodegradação e a solubilidade dos hidrocarbonetos de petróleo (CORSEUIL et al., 2006).

A formulação matemática do SCBR foi desenvolvida com base no modelo conceitual que representa um cenário comumente encontrado em centros urbanos, que é a contaminação das águas subterrâneas de unidades aquíferas não confinadas, como mostrado na Figura 1.

O modelo de fluxo bidimensional da água subterrânea para aquíferos não confinados implementado no SCBR é conhecida como equação de Boussinesq (FETTER, 1994). Formalmente, a equação de Boussinesq é obtida através da integração da equação tridimensional de fluxo sobre a dimensão vertical do aquífero, como mostrado na Equação (1), onde  $h$  é a carga hidráulica;  $K_x$  e  $K_y$  são componentes principais do tensor condutividade hidráulica, ao longo dos eixos de coordenadas  $x$  e  $y$ , respectivamente;  $|q_z|_0$  é a velocidade específica da água subterrânea, na direção de  $z$ , que atravessa a

base do aquífero, representando a drenança (ganho ou perda) de água através da interface com a camada confinante inferior;  $I$  é o termo de infiltração de água (recarga) através da superfície superior da zona saturada do meio, representando o volume de água introduzido no aquífero, por unidade de tempo;  $S_y$  é o coeficiente de armazenamento do meio não-saturado; e  $F$  representa o termo fonte ou sumidouro de água, ou seja, o volume de água introduzido (ou retirado) por unidade de área do meio e por unidade de tempo. O valor de  $F$  é positivo, se for uma fonte, e negativo se for um sumidouro (CORSEUIL et al., 2006).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + (q_z|_0 + I) + F = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

No SCBR é assumido que os poluentes dissolvidos na água subterrânea têm o seu comportamento influenciado por mecanismos de transporte e transformação. Estes mecanismos, dentre os quais se destacam a advecção, a dispersão, a sorção e a biodegradação, são responsáveis pela variação espacial e temporal da concentração dos contaminantes dissolvidos. Todos estes mecanismos são simulados no SCBR por meio da solução da Equação (2), onde  $\rho$  é a densidade do aquífero;  $C$  é a concentração do contaminante;  $t$  tempo;  $R$  é o coeficiente de retardo;  $D_{ij}$  é o tensor dispersão hidrodinâmica;  $\lambda$  é o coeficiente de biodegradação;  $V$  é a velocidade da água subterrânea;  $W$  é o fluxo volumétrico;  $n$  é a porosidade efetiva;  $x, y, z$  são os eixos coordenados. A biodegradação dos contaminantes é simulada segundo uma cinética de primeira ordem (CORSEUIL et al., 2006).

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} = \frac{1}{R} \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(\rho C V_i)}{\partial x_i} \right] - \lambda \rho C + \frac{W \rho C}{n \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (2)$$

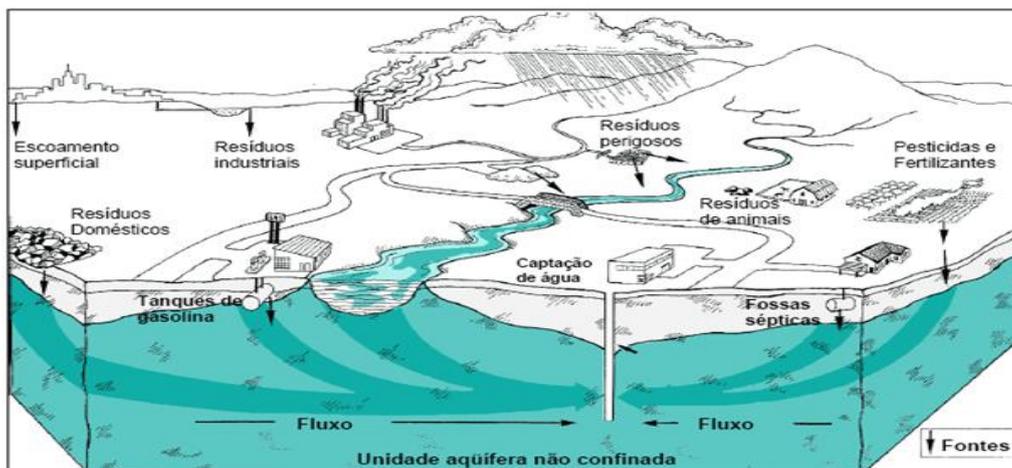


Figura 1 - Cenário de contaminação das águas subterrâneas de unidades aquíferas não confinadas (CORSEUIL et al., 2006).

#### 4. METODOLOGIA

Em casos de contaminação, as empresas são legalmente obrigadas a fazer o gerenciamento ambiental das áreas impactadas. As etapas licitatórias e os processos investigativos de campo, necessários para o gerenciamento, requerem muito tempo até que medidas emergenciais ou de remediação sejam implementadas. Assim, a utilização e a customização de um modelo computacional para uma área potencialmente contaminada, pode reduzir custos, otimizar o tempo no processo de gerenciamento e proporcionar maior eficiência na minimização dos impactos ambientais. Como forma

de apresentar a aplicação do SCBR no gerenciamento ambiental de áreas contaminadas, foi realizado um estudo de caso no Terminal de Petróleo de São Sebastião, de propriedade da Petrobras.

A customização do SCBR para uma determinada área, visando o gerenciamento das áreas impactadas, significa condensar as etapas do processo de identificação de áreas contaminadas (definição da região de interesse, identificação das áreas potencialmente contaminadas, avaliação preliminar, investigação confirmatória) mais a etapa de investigação detalhada, no que tange à caracterização hidrogeológica da área. A customização é feita sem a presença da fonte de contaminação, já que o evento de contaminação ainda não ocorreu, e o objetivo é preparar o modelo, com os dados característicos da área e com base na metodologia de gerenciamento da CETESB, antes de um evento de contaminação. Desta forma, no momento em que ocorra o derramamento, os dados de caracterização da área que, normalmente, são levantados ao longo das etapas, citadas anteriormente, já estariam compilados durante a preparação do SCBR para a área do terminal.

Os dados de caracterização da área necessários para customização do SCBR são referentes à avaliação preliminar (estudo histórico e do meio físico, definição dos bens a proteger); à investigação confirmatória (plano de amostragem, locação de poços de monitoramento, coleta e análise de amostras hidrogeoquímicas e levantamentos geofísicos); e à investigação detalhada (caracterização hidrogeológica, coleta e análise de amostras hidrogeoquímicas detalhadas, dados de nível d'água dos poços de monitoramento, parâmetros físico-químicos do solo, mapas potenciométricos, mapas de velocidades e mapas de condutividade hidráulica). Em caso de derramamento, para a caracterização da pluma de contaminação será necessário apenas posicionar a fonte de contaminação no local de ocorrência de derramamento. Além disso, o processo de recuperação das áreas contaminadas, envolvendo as etapas de avaliação de risco e de definição da tecnologia de remediação mais adequada, será iniciado mais brevemente.

No presente estudo, a aplicação do SCBR foi feita em duas etapas: customização do SCBR e elaboração de cenários críticos (Figura 2). Primeiramente, foi feita a customização do SCBR para a área do terminal, considerando-se, inicialmente, o georreferenciamento da área, a identificação de bens a proteger e a caracterização hidrogeológica. A locação dos poços de monitoramento e o ajuste do domínio de simulação foram realizados de forma que as condições de contorno ficassem as mais adequadas possíveis (CORSEUIL et al., 2006). A calibração dos parâmetros de fluxo subterrâneo foi feita através de um ajuste, por tentativa e erro, dos dados de condutividade hidráulica e porosidade efetiva, e comparando-se os valores simulados de carga hidráulica com os valores medidos em campo. O modelo de regressão linear com determinação do  $R^2$  foi utilizado para calibração. Para ajustes com  $R^2$  maiores que 0,8, a calibração foi considerada adequada (SCHNOOR, 1996). Com o modelo calibrado, pôde-se definir o modelo de fluxo subterrâneo com elaboração dos mapas de condutividade hidráulica e potenciométrico. Os dados de entrada foram obtidos do Relatório de Diagnóstico Ambiental do Terminal Aquaviário de São Sebastião (BRAIN TECNOLOGIA, 2004).

Após o SCBR ser considerado customizado para a área de estudo, foi executada a segunda etapa do estudo. Com base na análise da planta dos tanques e dutos no terminal e o produto armazenado em cada tanque, foram identificados os principais pontos potencialmente contaminadores, ou seja, as contaminações podem ser oriundas de vazamentos nos tanques de armazenamento ou de algum duto no terminal. A fim de demonstrar a importância da customização do SCBR, antes da ocorrência de vazamentos, foram definidos possíveis cenários de contaminação e, selecionado um cenário crítico para exemplificar o presente trabalho. Para elaboração deste cenário crítico, foi definida e caracterizada uma fonte de contaminação, um tanque de armazenamento de gasolina pura, e simulada a pluma de contaminação do benzeno que, dentre os BTEX, é o hidrocarboneto monoaromático mais prejudicial à saúde humana.

Por último, após uma análise do comportamento da pluma do contaminante benzeno na área de estudo, foram simuladas medidas emergenciais para conter esta pluma, até que se tenha uma avaliação de risco e um projeto de remediação adequados. Uma das medidas simuladas é apresentada no presente trabalho, trata-se de uma barreira hidráulica, de modo a não permitir a migração da pluma em direção a residências vizinhas.

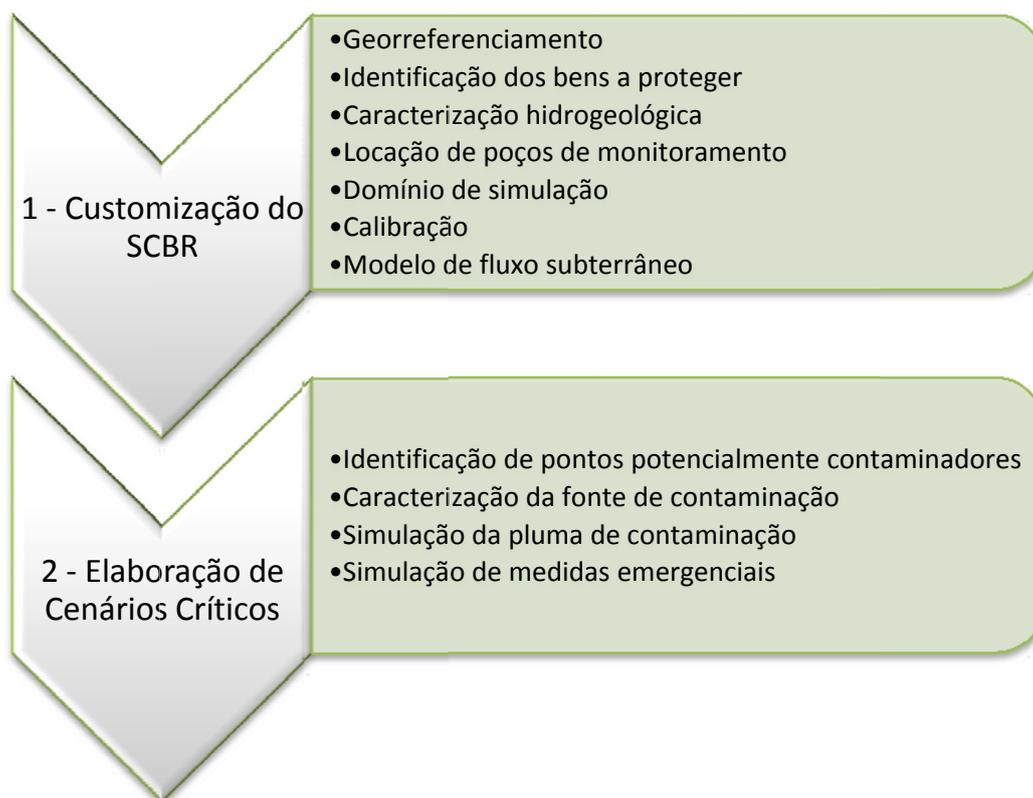


Figura 2 - Etapas da aplicação do SCBR no gerenciamento de áreas contaminadas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cidade de São Sebastião situa-se no Litoral Norte do Estado de São Paulo. Divisa com Caraguatatuba ao Norte, Bertioga ao Sul, Salesópolis a Oeste, o Oceano Atlântico e Ilhabela a Leste. O Terminal Aquaviário de São Sebastião está localizado na margem oeste do canal portuário e praticamente no centro do núcleo urbano da cidade de São Sebastião, nas coordenadas geográficas 23°48'12'' S (latitude) e 45°23'18'' W (longitude), distante cerca de 200 km da capital São Paulo. O terminal tem capacidade para armazenar 403.000m<sup>3</sup> de derivados e 1.418.000m<sup>3</sup> de petróleo (TRANSPETRO, 2009). A região de interesse do estudo foi definida como a área do terminal mais os bairros residenciais adjacentes; a praia, a leste do terminal; e a encosta, a oeste do terminal, conforme mostrado na Figura 3. Após o georreferenciamento da imagem aérea do terminal no SCBR, foram identificados os potenciais receptores de uma possível contaminação (bens a proteger). São estes, os bairros residenciais no entorno da área, dois córregos que drenam a área do terminal, Córrego Mãe Isabel e Córrego do Outeiro, e a área verde a oeste do terminal, também mostrados na Figura 3.

A análise dos resultados dos estudos histórico e do meio físico do Relatório de Diagnóstico Ambiental do Terminal Aquaviário de São Sebastião (BRAIN TECNOLOGIA, 2004) permitiu definir os parâmetros de caracterização hidrogeológica local. Na Figura 4, é apresentada a coluna hidrogeológica esquemática da área, onde podem ser reconhecidas duas unidades geológicas principais: a cobertura detrítica e o embasamento rochoso composto de rochas cristalinas granito-gnáissicas. A cobertura detrítica, cuja espessura pode variar de 0 a 8m, é constituída principalmente de um colúvio representado por blocos de rocha suportados por matriz areno-argilosa, o qual é usualmente sobreposto por uma camada de aterro, proveniente da fase de implantação do terminal. Sedimentos marinhos representados por areias contendo fragmentos de conchas foram detectados nas áreas próximas da linha de costa (BRAIN TECNOLOGIA, 2004).

A partir do contexto hidrogeológico local, pôde-se reconhecer, em termos hidráulicos, duas unidades aquíferas para a área do terminal: o aquífero poroso e livre desenvolvido sobre a cobertura detrítica e o aquífero fraturado desenvolvido no embasamento rochoso. O presente estudo



contemplou o aquífero poroso e livre desenvolvido sobre a cobertura, pela sua maior influência em sobre as atividades desenvolvidas no terminal, tendo em vista a significativa espessura da cobertura e o posicionamento do nível d'água na mesma (BRAIN TECNOLOGIA, 2004).



Figura 3 – Localização do Terminal de Petróleo de São Sebastião (em vermelho), dos bairros da cidade de São Sebastião (em verde), do Porto de São Sebastião (em laranja), do Córrego Mãe Isabel (em azul escuro) e do Córrego do Outeiro (em azul claro).

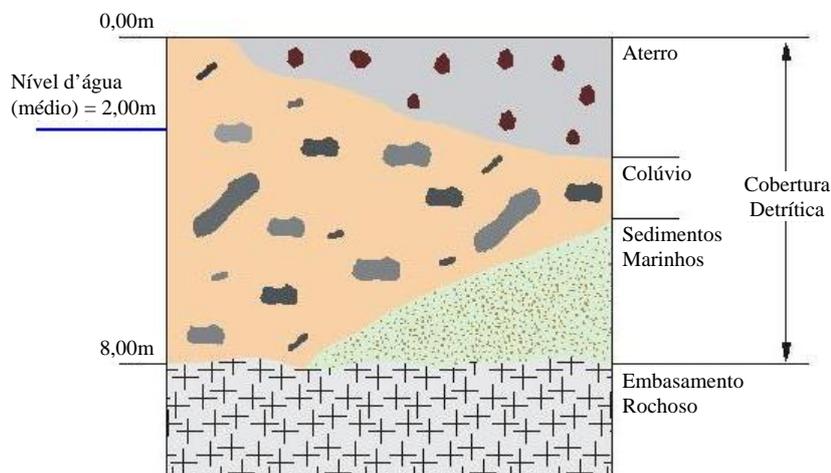


Figura 4 – Coluna hidrogeológica esquemática da área do terminal (BRAIN TECNOLOGIA, 2004).

Com os resultados dos levantamentos hidrogeológicos de 31 poços de monitoramento, foram definidos os parâmetros hidrogeológicos de entrada do SCBR, conforme mostrados na Tabela 1. Os dados de condutividade hidráulica, inseridos para cada poço, apresentavam uma faixa de variação relativamente grande, com valores oscilando de  $3,52 \times 10^{-5}$  cm/s a  $1,02 \times 10^{-2}$  cm/s. Destaca-se que os valores em sua grande maioria estavam dentro de uma faixa com ordem de grandeza de  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  cm/s, característica de terrenos constituídos por areias finas e areias com siltes.

Os demais parâmetros hidrogeológicos, não presentes no relatório de diagnóstico ambiental do terminal, foram definidos por meio de referências da bibliografia para a realização da

modelagem no SCBR. Esses dados, se levantados, poderiam melhorar a qualidade da customização do SCBR. Por exemplo, a porosidade efetiva, se levantada por poço de monitoramento, igual à condutividade hidráulica, proporcionaria dados mais fiéis de campo e uma maior confiança da modelagem. Para medidas mais precisas desses parâmetros são necessárias coletas e análises de amostras não deformadas do substrato para ensaios específicos de laboratório.

Tabela 1 – Parâmetros hidrogeológicos utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor
solo característico <sup>3</sup>	areia média a fina com silte
porosidade efetiva <sup>1</sup>	21%
condutividade hidráulica <sup>3</sup>	$3,52 \times 10^{-5} \text{cm/s} - 1,02 \times 10^{-2} \text{cm/s}$
densidade do solo <sup>1</sup>	2600kg/m <sup>3</sup>
carbono orgânico no solo <sup>1</sup>	0,3%
coef. part. carbono orgânico <sup>2</sup>	29,631/Kg

<sup>1</sup> (FETTER, 1994); <sup>2</sup> (SCHWARZENBACH et al., 2003);

<sup>3</sup> (BRAIN TECNOLOGIA, 2004)

A locação, no SCBR, dos 31 poços de monitoramento de águas subterrâneas na região de interesse é apresentada na Figura 5. Os valores de carga hidráulica inseridos, para cada poço, variaram dentro de uma faixa de 0,66m a 14,61m, com valor médio de 4,49m.

O domínio da simulação foi ajustado de forma que as condições de contorno do modelo ficassem as mais adequadas possíveis, ou seja, haver poços de monitoramento nos limites do domínio, conforme mostrado na Figura 5. O domínio de simulação tem dimensões de 1280m x 1835m, com uma malha de 5m x 5m, configurando 256 volumes na menor dimensão e 367 volumes na maior dimensão. Cabe ressaltar, que o esquema de posicionamento dos poços de monitoramento foi elaborado previamente a este estudo e, devido a isto, verifica-se que, no ajuste do domínio de simulação, existem algumas áreas sem a presença de poços de monitoramento para exercer a função de condição de contorno. Estas áreas podem ser evitadas se o esquema de posicionamento dos poços estiver de acordo com o modelo numérico do SCBR para a definição do domínio de simulação. A instalação de poços nessas áreas evita que o modelo faça extrapolações numéricas excessivas na hora de calcular o mapa de fluxo subterrâneo, tornando, portanto, a customização do SCBR mais precisa.

A calibração dos parâmetros de fluxo subterrâneo apresentou um valor de R<sup>2</sup> igual a 0,93, configurando o modelo calibrado. O mapa potenciométrico elaborado da área é mostrado na Figura 6. Os valores calculados de carga hidráulica variaram dentro de uma faixa de 0,57m a 15m. Verifica-se a predominância na direção do fluxo sendo de oeste para leste, isto é, dos maiores valores de carga hidráulica para os menores (da cor azul escuro para a cor azul claro).

O mapa de isovalores de condutividade hidráulica é mostrado na Figura 7. Os valores mais elevados de condutividade hidráulica são observados no setor nordeste da área (cores laranja e vermelha). Outro fator de interesse que deve ser destacado é a redução nos valores de condutividade hidráulica em direção aos extremos sudoeste e sul (cor amarela). Assim, a customização do SCBR foi finalizada e procedeu-se a segunda etapa do estudo, isto é, a elaboração de cenários críticos (Figura 2).

A criação de possíveis cenários críticos de contaminação tem por objetivo ressaltar a importância desta customização em casos de contaminações reais. Foi identificado que as contaminações podem ser oriundas de vazamentos nos tanques de armazenamento ou de algum duto no terminal. O cenário crítico, selecionado para exemplificar o presente trabalho, foi identificado pelo fato do ponto potencialmente contaminador (tanque de armazenamento) estar localizado no perímetro da região nordeste do terminal, onde a velocidade do fluxo subterrâneo é alta (área de alta condutividade hidráulica) e os limites do terminal fazem divisa com um dos bairros vizinhos (Figuras 5 e 6). Para elaboração deste cenário crítico, foi definida e caracterizada uma fonte de contaminação e simulada a pluma de contaminação do benzeno.



Figura 5 – Localização dos poços de monitoramento (azul) e domínio da simulação (amarelo).

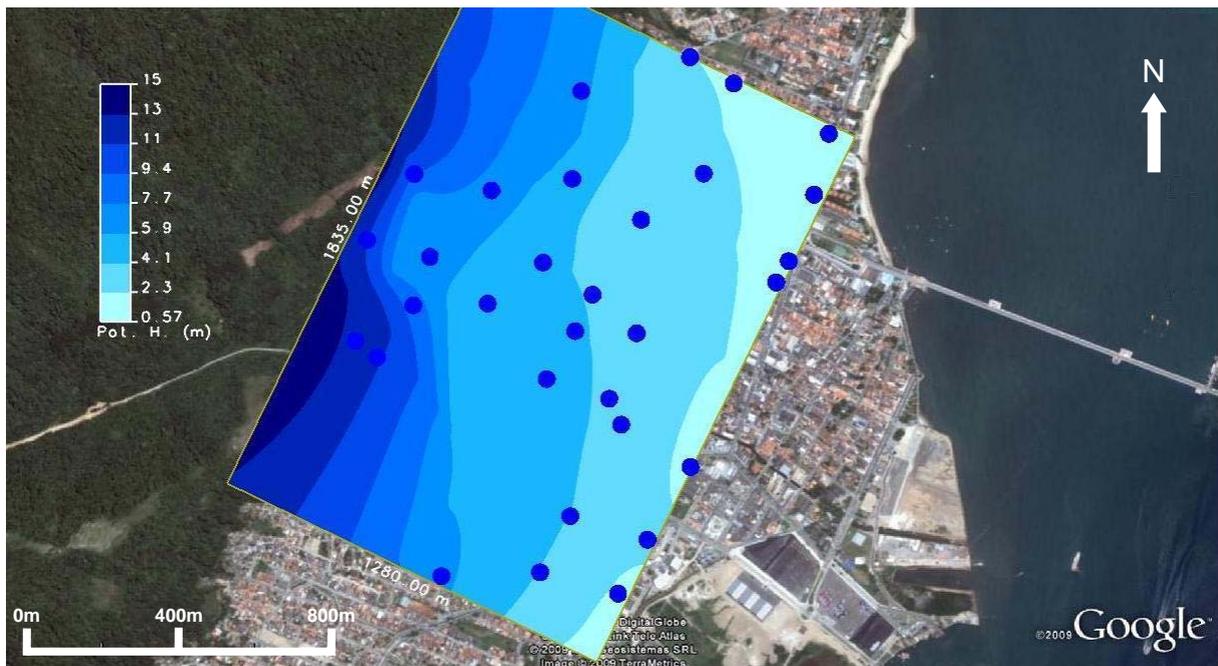


Figura 6 – Mapa potenciométrico da área de estudo.

Para caracterização da fonte de contaminação foi considerado o produto gasolina pura armazenado no tanque e os seus componentes. A gasolina contém benzeno, um composto monoaromático, que é, comprovadamente, cancerígeno à saúde humana para concentrações acima 5µg/l, e possui alta mobilidade. Portanto, foi considerado, como fator ponderante, para avaliação da contaminação, a extensão da pluma de benzeno devido a esse vazamento. Foi simulado o vazamento de 5m<sup>3</sup> de gasolina pura na zona saturada do solo, pois a profundidade do nível d'água na área do tanque é menor que 5m e que, por motivo de segurança, considera-se o cenário mais crítico, desprezando o tempo de lixiviação do produto no solo até atingir a água subterrânea (SCBR - GUIA DO USUÁRIO, 2008). Os parâmetros de transporte e transformação dos contaminantes para

simulação desse cenário são mostrados na Tabela 2. Diante da inexistência de dados de campo para a biodegradação do benzeno, foi adotada uma medida mais conservadora, isto é, coeficiente de biodegradação igual a zero, devendo ser feita análise de campo para sua determinação. Da mesma forma, a inexistência de dados de campo para o coeficiente de retardo respaldou o uso de dados da literatura.

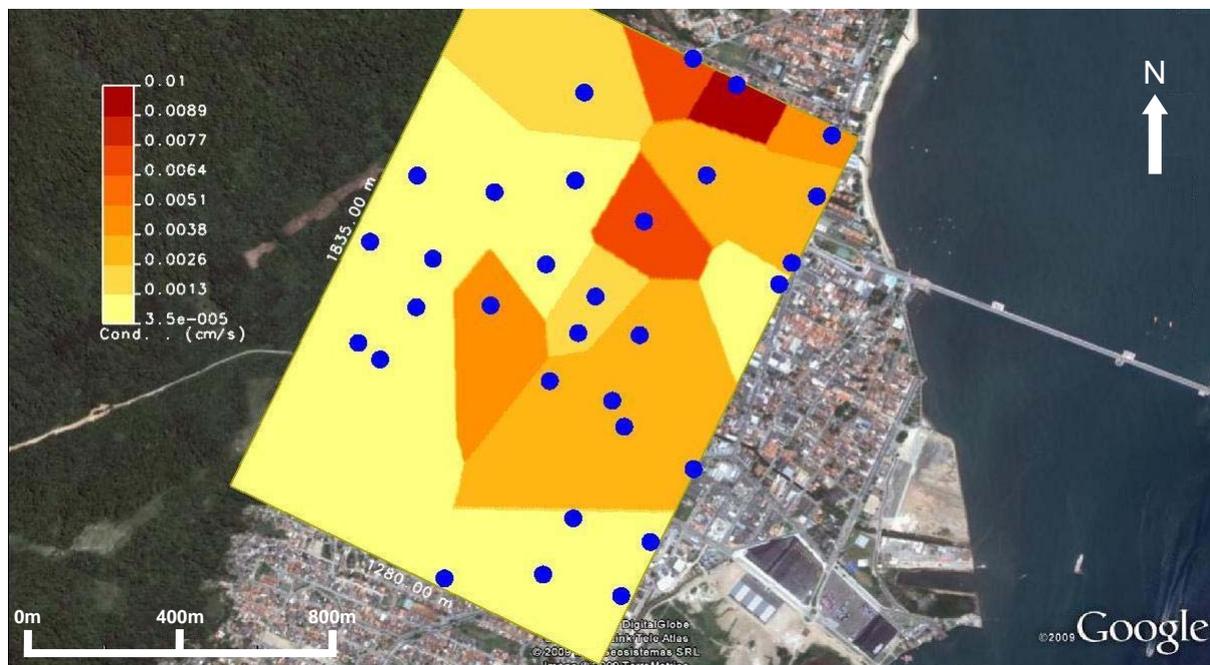


Figura 7 – Mapa de isovalores de condutividade hidráulica da área de estudo.

Tabela 2 – Parâmetros de transporte e transformação dos contaminantes.

Parâmetro	Valor
dispersividade longitudinal da pluma <sup>2</sup>	0,1m
volume do produto derramado <sup>2</sup>	5m <sup>3</sup>
espessura da mistura <sup>2</sup>	2m
modelo de fonte <sup>2</sup>	Lei de Raoult
coef. de decaimento do benzeno <sup>2</sup>	0
coef. de retardo do benzeno <sup>1</sup>	2,09

<sup>1</sup> (SCHWARZENBACH et al., 2003); <sup>2</sup> (valor adotado para simulação)

Após a simulação da contaminação, foi elaborada a pluma de benzeno originada por esse vazamento. Na Figura 8, é mostrada a extensão da pluma de benzeno que é de, aproximadamente, 200m, 56 meses após o vazamento. Este é o tempo necessário para que a pluma saia dos limites do terminal e atinja as residências do bairro vizinho com concentrações acima do valor máximo permitido de 5µg/l. A pluma apresenta concentrações máximas de 14mg/l. Em um tempo igual a 20 anos, esta pluma ainda estaria migrando em direção à praia e atingindo os bairros vizinhos, conforme mostrado na Figura 9.

Portanto, no caso de ocorrer um vazamento desta magnitude, é necessária uma avaliação do risco causado por esse vazamento e, conseqüentemente, um projeto de remediação. Devido à dimensão do trabalho, não foi apresentada aqui uma avaliação de risco, mas foi simulada uma intervenção com a construção de uma barreira hidráulica, de modo a não permitir a migração da pluma em direção às residências vizinhas. Esta medida emergencial é adequada para os casos em que há demora para se ter uma avaliação de risco e projeto de remediação adequados.



Vale ressaltar, que como já se conhece o modelo de fluxo subterrâneo e o comportamento físico-químico do contaminante, quando houver a suspeita da contaminação, a localização de poços do plano de amostragem se dará de forma otimizada e precisa, pois já se conhece a direção do fluxo hidráulico e de migração da pluma.



Figura 8 – Pluma de contaminação de benzeno, 56 meses após o vazamento, com extensão de, aproximadamente, 200m. Pluma saindo dos limites do terminal e atingindo os bairros vizinhos.



Figura 9 - Pluma de contaminação de benzeno 20 anos após o vazamento, migrando em direção à praia e já fora dos limites do terminal.

Supondo que todo o processo burocrático para efetiva operação da intervenção emergencial leve em torno de 12 meses, ou seja, a barreira hidráulica somente teria funcionalidade a partir do décimo segundo mês após o vazamento, conforme mostrado na Figura 10. No instante de instalação da barreira, a pluma ainda estaria dentro dos limites do terminal, com extensão de,



aproximadamente, 80m e, então, não teria meio de sair dos limites do terminal. Com isto a entidade gerenciadora ganharia tempo para executar os diversos serviços até a implantação da remediação daquele local. Na Figura 11, é mostrada a extensão da pluma, contida pela barreira, após 10 anos, confirmando que a mesma não migraria para fora dos limites do terminal e já estaria contida pela barreira hidráulica. A extensão da pluma contida pela barreira não passaria de 70m, por outro lado, caso a barreira não seja instalada, a extensão da pluma poderia chegar a mais de 200m, conforme mostrado na Figura 12.



Figura 10 – Pluma de contaminação de benzeno no instante de instalação da barreira hidráulica, 12° mês após o vazamento. Extensão da pluma de, aproximadamente, 80m.



Figura 11 – Pluma de contaminação de benzeno contida pela barreira hidráulica 10 anos após o vazamento. Extensão da pluma de, aproximadamente, 70m.



Figura 12 - Pluma de contaminação de benzeno 10 anos após o vazamento, sem a instalação da barreira hidráulica. Extensão da pluma maior que 200m.

## 7. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho, conclui-se que a customização do SCBR, para áreas potencialmente contaminadas, pode otimizar o gerenciamento ambiental.

Durante as etapas de customização, foram observadas vantagens de se ter um modelo ajustado a uma área, pois, a possibilidade de ganho de tempo e eficiência na minimização de impactos é notável. Dentre elas, a rapidez de resposta do SCBR, a partir da elaboração de cenários críticos, em relação ao tempo necessário para que a pluma de contaminação atinja um bem a proteger. Isto significa saber o tempo disponível, após uma contaminação, para que seja feita uma intervenção eficiente pela entidade gerenciadora.

Além disso, identificou-se que a qualidade dos dados de entrada, isto é, a utilização de dados específicos da região ao invés de dados genéricos é relevante para a precisão da resposta de simulação do SCBR. A existência de dados locais para as propriedades físico-químicas do solo como, por exemplo, a fração do carbono orgânico no solo e a porosidade efetiva por poço de monitoramento, evita simplificações do modelo e aproxima o resultado final à realidade local. Esse fato nos permite recomendar a elaboração de um roteiro de dados e informações necessárias para a realização da customização a fim de otimizar esse processo.

A decisão pela customização, por parte da entidade gerenciadora, pode facilitar o diálogo com o órgão ambiental, à medida que demonstra tanto a responsabilidade ambiental na prevenção de impactos, como agiliza as medidas mitigadoras.

Por último, cabe ressaltar, que todo o trabalho foi realizado com base em dados levantados para um determinado período de tempo. Qualquer alteração nas propriedades do meio físico ou caso sejam feitos novos levantamentos, a customização do SCBR deve ser atualizada, visando deixar o modelo preparado com as informações de campo mais recentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAIN TECNOLOGIA. (2004). **Relatório de Diagnóstico Ambiental – Terminal Aquaviário de São Sebastião**. Técnicas GPR 2D/Tomografia Elétrica/Sondagens/Hidrogeologia/Análises Geoquímicas e Hidroquímicas. Volumes 1 a 4.

CETESB. (2001). **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental/DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT. São Paulo: Ed. CETESB.

CORSEUIL, H. X., & FERNANDES, M. (2000). Results of a natural attenuation experiment for an ethanol-blended gasoline spill. **Natural Attenuation and Gasoline Oxygenates**, 24-31.

CORSEUIL, H. X., SCHNEIDER, M. R., ROSÁRIO, M., & MALISKA JR., C. (2006). **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. Anais.

FETTER, C. W. (1994). **Applied Hydrogeology** (3ª ed.). New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

FITTS, C. R. (2002). **Groundwater Science**. San Diego: Academic Press.

MANDLE, R. J. (2002). **Groundwater Modeling Guidance**. Ground Water Modeling Program, Michigan Department of Environmental Quality (MDEQ), Michigan.

PETROBRAS – Petróleo brasileiro S.A.; UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina; ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software. (2008). **SCBR - Guia do Usuário**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Remediação de Águas Subterrâneas, Florianópolis.

SCHNOOR, J. L. (1996). **Environmental modeling: fate and transport of pollutants in water, air and soil** (first ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.

SCHWARZENBACH, R. P., GSCHWEND, P. M., & IMBODEN, D. M. (2003). **Environmental Organic Chemistry** (second ed.). New York: Wiley-Interscience.

TRANSPETRO. (2009). **Dados do Terminal de São Sebastião**. Disponível em [www.transpetro.com.br](http://www.transpetro.com.br) Acesso em outubro de 2009.

WIEDEMEIER, T. H., RIFAI, H. S., NEWEL, C. J., & WILSON, J. T. (1999). **Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface**. New York: John Wiley & Sons, Inc.