

# Solução Corretiva baseada no Risco (SCBR): Modelo Matemático de Tomada de Decisão para o Gerenciamento Ambiental de Águas Subterrâneas Contaminadas

Henry X. Corseuil<sup>1</sup>; Márcio R. Schneider<sup>2</sup>; Mário do Rosário<sup>3</sup> e Clovis Maliska Júnior<sup>4</sup>.

<sup>1,2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campus Universitário, Trindade, Florianópolis, SC, 88040-970. [www.remas.ufsc.br](http://www.remas.ufsc.br).

<sup>2</sup>CENPES -Centro de Pesquisas da Petrobras, Gerência de Biotecnologia e Tratamentos Ambientais, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ. [marios@petrobras.com.br](mailto:marios@petrobras.com.br).

<sup>3</sup>ESSS- Engineering Simulation and Scientific Software. Rod SC401 - Km 001, ParqTec ALFA - CELTA - Sala 4.01 Florianópolis - SC – Brasil, CEP: 88030-000. [www.esss.com.br](http://www.esss.com.br)

## Resumo

Há mais de dez anos, a Universidade Federal de Santa Catarina, em parceria com a Petrobras, tem desenvolvido experimentos de campo e de laboratório sobre a problemática da contaminação das águas subterrâneas por hidrocarbonetos de petróleo e etanol. Estes estudos demonstram que a presença do etanol nas águas subterrâneas pode interferir significativamente sobre o destino e transporte dos contaminantes e, conseqüentemente, no risco associado à área impactada. Os resultados obtidos nos experimentos de campo motivaram o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que simulasse o transporte de contaminantes em águas subterrâneas, atendendo as especificidades de cenários de contaminação por gasolina com etanol encontrados no Brasil. O objetivo deste trabalho é apresentar aos cientistas e profissionais de águas subterrâneas uma ferramenta inovadora de simulação do transporte de contaminantes em águas subterrâneas, demonstrando a interferência do etanol em cenários de derramamentos de gasolina, em aquíferos não confinados.

## Abstract

For over ten years, the Federal University of Santa Catarina, together with Petrobras, has carried out field and laboratorial experiments on groundwater contamination by petroleum hydrocarbons and ethanol. These studies show that the presence of ethanol in groundwater can significantly affect contaminant fate and transport and, therefore, the risk associated with the impacted area. The results from the field experiments motivated the development of an easy-to-use computational tool that would simulate contaminant transport and transformation in groundwater, and that would be adequate to the specificities of gasoline and ethanol contamination scenarios found in Brazil. This work aims at presenting, to scientist and professionals of groundwater, this

innovative tool which simulates fate and transport of contaminants, demonstrating ethanol interference in scenarios of gasoline spills, in unconfined aquifers.

Palavras-chave: água subterrânea, modelagem matemática, gasolina com etanol.

## 1 – Introdução

A busca por instrumentos de proteção e de remediação de águas subterrâneas tem se intensificado à medida que relatórios ambientais de diversas organizações, como as Nações Unidas [1], têm divulgado novos dados sobre o incremento da demanda mundial por água potável e a deterioração dos recursos hídricos por atividades antrópicas. Para minimizar os riscos de contaminação das águas subterrâneas e para definição de estratégias de recuperação de áreas já impactadas, a modelagem matemática do transporte e transformação de poluentes têm sido utilizada como uma importante ferramenta de tomada de decisão no gerenciamento ambiental de áreas impactadas [2, 3]. Os modelos matemáticos são empregados para realização de estimativas sobre a velocidade da água subterrânea e direção de fluxo, previsões de cenários passados e futuros sobre a evolução das plumas de contaminação, predição do transporte de contaminantes para avaliação de risco, definição de pontos de monitoramento em campo, avaliação e seleção de alternativas de remediação em um local contaminado.

Existem vários tipos de modelos matemáticos aplicáveis às águas subterrâneas [4,5]. A maioria dos modelos possui uma estrutura determinística que relacionam a causa e o efeito de maneira exata, sem a inclusão de incertezas estatísticas no processo de simulação. Os modelos ainda podem representar os fenômenos físicos que ocorrem nos aquíferos a partir de soluções analíticas ou numéricas para simulação de problemas com estrutura espacial de uma, duas ou três dimensões. Apesar da variedade de modelos matemáticos disponíveis no mercado, existem fenômenos físicos de contaminação das águas subterrâneas que não são simulados em modelos disponíveis no mercado. Exemplo disto é o caso de derramamento de gasolina comercial brasileira em postos de serviço, cuja composição recebe a adição de 20 a 25% de etanol.

Mais de dez anos de estudos de campo e de laboratório, realizados pela Universidade Federal de Santa Catarina nas áreas Experimentais da Fazenda Ressacada, têm demonstrado que a presença do etanol em derramamentos de gasolina pode afetar significativamente o comportamento dos hidrocarbonetos do petróleo em sistemas subsuperficiais. Corseuil et al. [6] demonstraram que a presença do etanol em águas subterrâneas pode aumentar a solubilidade dos hidrocarbonetos de petróleo através do efeito cossolvência. Na presença de 10% de etanol a solubilidade do benzeno,

tolueno, orto-xileno e naftaleno aumentaram em 20%, 40%, 50% e 73%, respectivamente. Além disso, o etanol quando está presente na água subterrânea junto com as plumas de hidrocarbonetos do petróleo, torna-se o substrato preferencial em detrimento da biodegradação dos compostos BTEX [7]. Estes estudos concluíram que maiores concentrações de hidrocarbonetos poderão ser transferidas à água subterrânea devido ao efeito co-solvência, e maiores extensões de plumas de hidrocarbonetos poderão ser encontradas em função do etanol ser biodegradado preferencialmente.

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 matemático SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco. A concepção e o desenvolvimento do programa computacional foi realizado pela Universidade Federal de Santa Catarina, Petrobras e a empresa de base tecnológica ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software. O SCBR é um modelo bi-dimensional, numérico, que simula cenários de contaminação de aquíferos não confinados. Em caso de derramamentos de gasolina brasileira, o SCBR considera a interferência do etanol nos processos de solubilização e biodegradação. O modelo simula estratégias de remediação ativa, como barreiras físicas, sistemas de injeção, bombeamento e processos que resultem no aumento da cinética de biodegradação. Além disso, acomoda múltiplas fontes de contaminação, banco de dados de produtos e contaminantes, banco de dados hidrogeológicos, simula a intemperização da fonte, utiliza dados georeferenciados, dentre outras características.

O objetivo deste trabalho é apresentar aos cientistas e profissionais de águas subterrâneas uma ferramenta inovadora de simulação do transporte de contaminantes em águas subterrâneas, demonstrando a interferência do etanol em cenários de derramamentos de gasolina com etanol em aquíferos não confinados.

## 2 – Formulação Matemática

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 (Figura 1). Neste modelo conceitual, os mecanismos primários de liberação de contaminantes para as águas subterrâneas são vazamentos ou derramamentos decorrentes de falhas ou acidentes em sistemas de armazenamento e distribuição de produtos químicos (ex.: combustíveis, tintas, solventes, etc), a disposição inadequada de resíduos tóxicos, atividades agrícolas, sistemas de tratamento de esgotos individuais e etc.

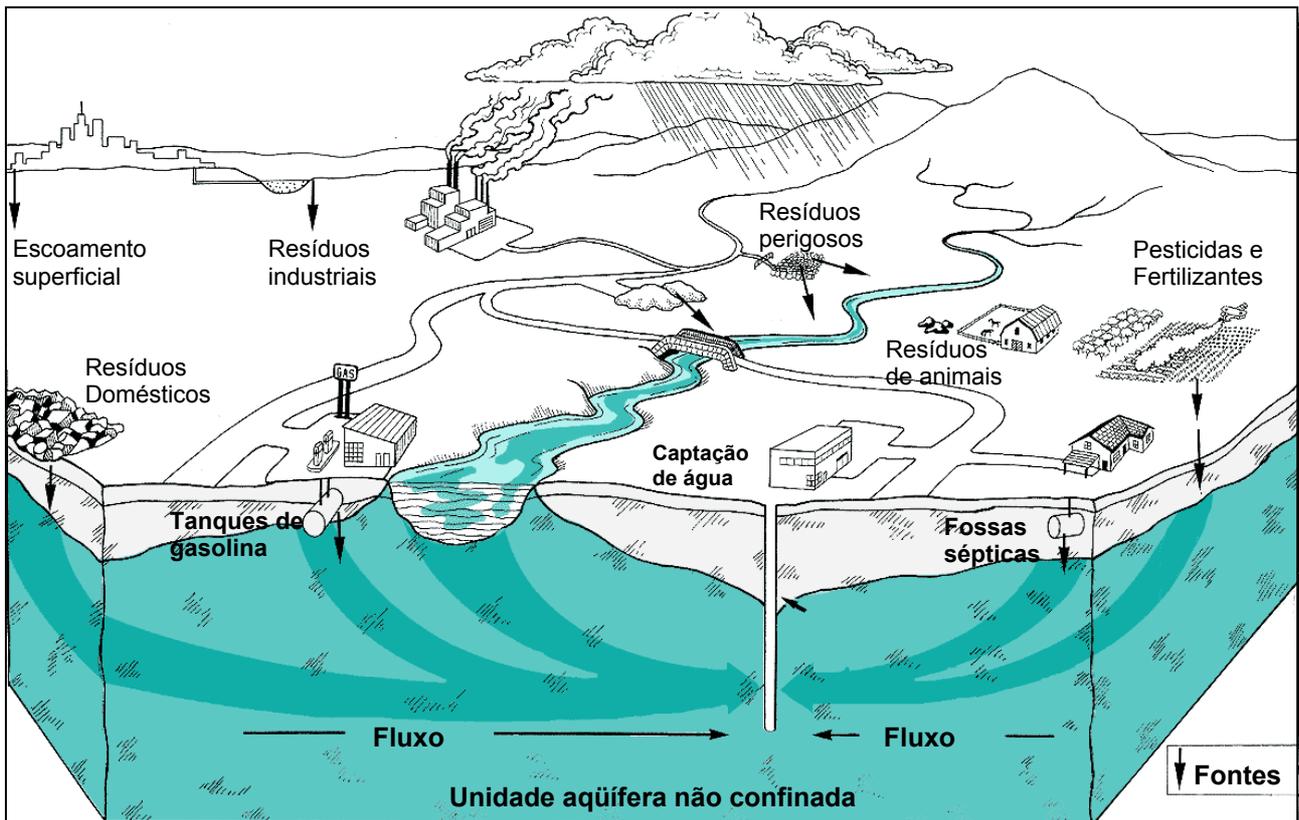


Figura 1. Cenário da contaminação das águas subterrâneas de unidades aquíferas não confinadas.

Fonte: Adaptado de Water Resources Educational Network (<http://pa.lwv.org/wren/pubs/primer.html>).

O modelo de fluxo bidimensional da água subterrânea para aquíferos não confinados implementado no SCBR é conhecida como equação de Boussinesq [8]. Formalmente, a equação de Boussinesq é obtida através da integração da equação tridimensional de fluxo sobre a dimensão vertical do aquífero:

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

onde:  $K_x$  e  $K_y$  são componentes principais do tensor condutividade hidráulica, ao longo dos eixos de coordenadas  $x$  e  $y$ , respectivamente [L/T];  $[q_z]_0$  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 [L/T];  $I$  é 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 [L/T];  $S_y$  é o coeficiente de armazenamento do meio não-saturado, [adimensional] 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 [L<sup>3</sup>/L<sup>2</sup>.T]. O valor de  $F$  é positivo, se for uma fonte, e negativo se for um sumidouro. As condições de contorno utilizadas na solução da Equação 1 são: a de 1º Tipo (Dirichlet), onde a carga

hidráulica é especificada no contorno, e o caso especial da condição de 2º Tipo (Neumann), especificado no contorno a condição de não fluxo.

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. A advecção é o mecanismo responsável pelo deslocamento dos contaminantes em função do fluxo da água subterrânea. É o principal mecanismo de transporte de massa de soluto na água subterrânea. A dispersão hidrodinâmica é o mecanismo responsável pelo espalhamento horizontal e vertical dos contaminantes dissolvidos em função da difusão molecular e principalmente de gradientes de velocidade no meio poroso saturado. A sorção representa o fenômeno de partição das moléculas dos poluentes dissolvidos na água subterrânea para a fase sólida, o que resulta no retardamento do deslocamento da pluma de contaminação. A biodegradação é o principal mecanismo de redução de massa de contaminantes e representa uma reação de oxidação-redução, em que os hidrocarbonetos de petróleo e de etanol são oxidados, ou seja, doam elétrons a um receptor de elétrons que os recebe. Todos estes mecanismos são simulados no SCBR por meio da solução da seguinte equação:

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

onde  $\rho$  a densidade do aquífero [M/L<sup>3</sup>],  $C$  é a concentração do contaminante [M/L<sup>3</sup>],  $t$  tempo [T],  $R$  é o coeficiente de retardo [-],  $D_{ij}$  é o tensor dispersão hidrodinâmica [L<sup>2</sup>/T],  $C$  é a concentração [M/L<sup>3</sup>],  $\lambda$  é o coeficiente de biodegradação [1/T],  $V$  é a velocidade da água subterrânea [L/T],  $W$  é o fluxo volumétrico [L<sup>3</sup>/T],  $n$  é a porosidade efetiva,  $x, y, z$  são os eixos coordenados. A biodegradação dos contaminantes é simulado segundo uma cinética de primeira ordem.

A interferência do etanol em cenários de derramamentos de hidrocarbonetos de petróleo e etanol (ex.: gasolina comercial brasileira) é simulada no SCBR considerando a preferencial biodegradação do etanol o efeito cossolvência. A preferencial degradação do etanol resulta na inibição da biodegradação dos hidrocarbonetos do petróleo. O SCBR simula este fenômeno atribuindo valor nulo ao coeficiente de biodegradação ( $\lambda$ ) dos hidrocarbonetos do petróleo enquanto a cocentração de inibição prescrita for menor que a concentração de etanol simulada. Dados da Área Experimental da Ressacada indicam que a concentração de inibição mínima é da ordem de 5 a 10 mg/L. O efeito cossolvência é simulado no SCBR através de um modelo log-linear no qual a concentração dos compostos hidrofóbicos aumenta log-linearmente com o aumento da fração volumétrica de etanol disponível no aquífero [6]:

$$\log S_m = \log S_w + \sigma f \quad (3)$$

onde:  $S_m$  é a solubilidade do soluto na mistura co-solvente-água;  $S_w$  é solubilidade do composto orgânico hidrofóbico na água pura;  $f$  = fração em volume do co-solvente;  $\sigma$  é a medida da capacidade relativa do co-solvente em solubilizar os compostos orgânicos hidrofóbicos (energia de co-solvência).

$$\sigma = a \log k_{ow} + b \quad (4)$$

onde:  $a$  e  $b$  são constantes empíricas que dependem da classe do composto aromático;  $K_{ow}$  é o coeficiente de partição octanol-água.

Para a solução das equações de fluxo e transporte o SCBR emprega o método numérico conhecido como Volumes Finitos [9]. A opção pela solução numérica das equações, ao invés da analítica, traz maior robustez ao modelo, permitindo sua aplicação em diferentes circunstâncias, incorporando na simulação a heterogeneidade do aquífero, múltiplas fontes de contaminação, bombeamentos, barreiras, rios e lagos. O Método de Volumes Finitos (MVF) tem como principal característica o emprego de volumes de controle na discretização do domínio ao invés de pontos na malha, como trabalha o Método de Diferenças Finitas. A principal vantagem do MVF é realização de um balanço de conservação da propriedade que está sendo simulada em cada volume elementar da malha, eliminando inconsistências de perda ou ganho de propriedades (massa, quantidade de movimento, etc) no interior do domínio de cálculo, satisfazendo a conservação das propriedades.

### 3 – Metodologia

Para demonstrar a aplicação do SCBR em áreas impactadas e como o etanol pode afetar o transporte e a transformação dos hidrocarbonetos de petróleo em derramamentos de gasolina, foi realizada a simulação de quatro derramamentos fictícios de gasolina com etanol. Foram criadas quatro fontes de contaminação em um domínio de 50 x 100 m, cada uma com 5000 litros de quatro tipos diferentes de gasolina: E-0 (gasolina tipo A, sem adição de etanol), E-10 (10% etanol), E-25 (25% etanol) e E-85 (85% etanol). Das gasolinas com etanol, a gasolina E-10 é a mais difundida no mundo, sendo comercializada em países como os EUA, Canadá, Austrália, China e etc. A gasolina com 25% etanol é comercializada no Brasil e a E-85 é comercializada nos EUA. Considerando que a gasolina apresenta em sua constituição dezenas de componentes químicos, para esta simulação o benzeno foi eleito o composto representativo da contaminação da água subterrânea por ser o compostos de maior importância ambiental em derramamentos de gasolina. A avaliação da interferência do etanol sobre o benzeno dissolvido foi realizada por meio de mapas de isoconcentração das plumas de contaminação e gráficos de concentração ao longo da distância. O delineamento das plumas de benzeno foi definido pela concentração de 5 µg/L, que corresponde ao

padrão de potabilidade do benzeno em água, conforme estabelecido pela Portaria 518 do Ministério da Saúde.

O fluxo da água subterrânea foi simulado a partir da prescrição das características hidrogeológicas do cenário fictício. Ao domínio de simulação foi atribuída uma condutividade hidráulica ( $1,8 \times 10^{-4}$  cm/s), porosidade efetiva (0,2) e não foram considerados efeitos de sorção (coeficiente de retardo = 1). A condição de contorno utilizada para o fluxo foi a prescrição da carga hidráulica em quatro pontos de análise, como no caso da obtenção de leituras de carga hidráulica em piezômetros. As cargas hidráulicas foram entradas de forma que o gradiente hidráulico fosse constante ao longo do domínio (igual a 0,01 m/m). Os tempos de meia-vida do benzeno e do etanol adotados para os quatro derramamentos foram 0,3 e 1 ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Estes parâmetros cinéticos de biodegradação são os mesmos obtidos em um experimento controlado de derramamento de gasolina comercial brasileira (24% etanol), realizado pela Universidade Federal de Santa Catarina, na Fazenda Ressacada [10]. O coeficiente de dispersão longitudinal e transversal foi definido como sendo igual a 0,1 e 0,01 m, respectivamente.

Todo o processo de simulação do fluxo e do transporte de contaminantes foi realizado em 3 etapas. Na primeira etapa, a equação do fluxo (Equação 1) foi resolvida para a distribuição da carga hidráulica no domínio de simulação. Na seqüência, a distribuição da carga hidráulica foi utilizada juntamente com a condutividade hidráulica e a porosidade efetiva para o modelo calcular o campo de velocidades, utilizando-se a Lei de Darcy [8]. Por fim, a equação do transporte de contaminantes (Equação 2), acrescida do efeito cossolvência (Equação 3) e do efeito da preferencial biodegradação do etanol, foi resolvida utilizando o campo de vetores velocidade obtida na etapa anterior. Outras simulações também foram realizadas para demonstrar o potencial de aplicação do SCBR em cenários em que são necessárias avaliações sobre a eficácia de tecnologias de remediação como barreiras e bombeamentos.

#### 4 – Resultados

A simulação do fluxo da água subterrânea a partir das características hidrogeológicas prescritas resultou em um campo de velocidades homogêneo, orientado de Oeste para Leste, com vetores de magnitude igual a 2,8 m/ano (Figura 2). Os resultados das simulações das plumas de benzeno dos derramamentos de gasolina pura, E-10, E-25 e E-85 são apresentadas na Figura 3. A seqüência de imagens da evolução das plumas de benzeno demonstram que, em todos os casos em que o etanol estava presente, as plumas alcançaram uma extensão máxima de 40 metros. Mesmo no derramamento que havia 10% de etanol houve um incremento no comprimento semelhante ao derramamento com 25% e 85% de etanol, corresponde a aproximadamente 30% da extensão da

pluma de benzeno sem etanol. Apesar do efeito do etanol ter sido o mesmo para todas as plumas, foi observado que nas fontes de contaminação das gasolinas com etanol as concentrações aquosas de etanol foram superiores à 50%. Sabe-se que concentrações aquosas de etanol superiores a 40% são tóxicas aos microorganismos, inibindo a biodegradação do etanol. Além disso, estima-se que fatores geoquímicos, como a disponibilidade de nutrientes para a biodegradação do etanol e características hidrogeológicas do local possam interferir significativamente reduzindo a cinética de biodegradação do etanol. Desta forma, foi realizada uma nova simulação das plumas de benzeno, mas assumindo uma cinética de biodegradação menor, ou seja, o tempo de meia vida do etanol de 0,3 foi aumentado para 0,6 anos. Neste novo cenário foi observado que as plumas de benzeno provenientes das fontes com 25% e 85% etanol alcançaram o dobro da extensão da pluma de benzeno proveniente da fonte de gasolina pura. Estes resultados indicam que a interferência do etanol sobre os comprimentos das plumas de contaminação são fortemente dependentes da cinética de biodegradação do etanol, que é dependente das características geoquímicas e hidrogeológicas do meio impactado.

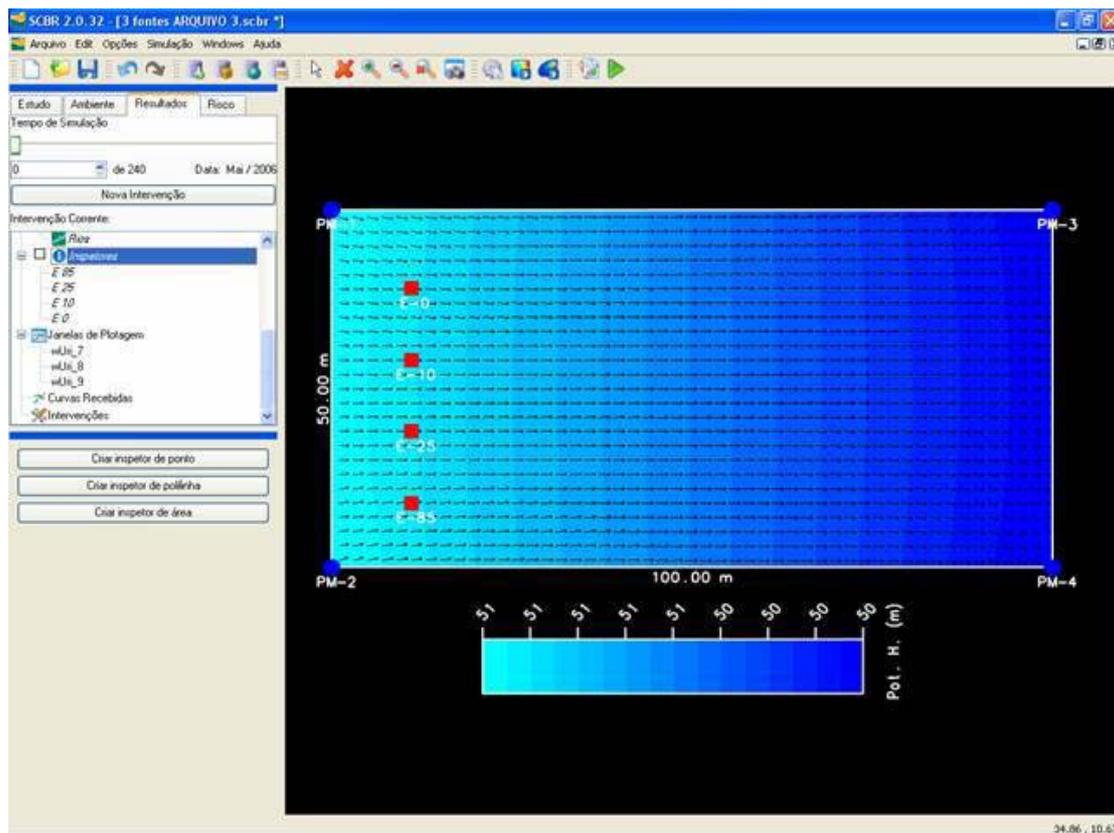


Figura 2. Campo de velocidades da água subterrânea e mapa potenciométrico simulado com o modelo SCBR em um domínio de 50 x 10 m.

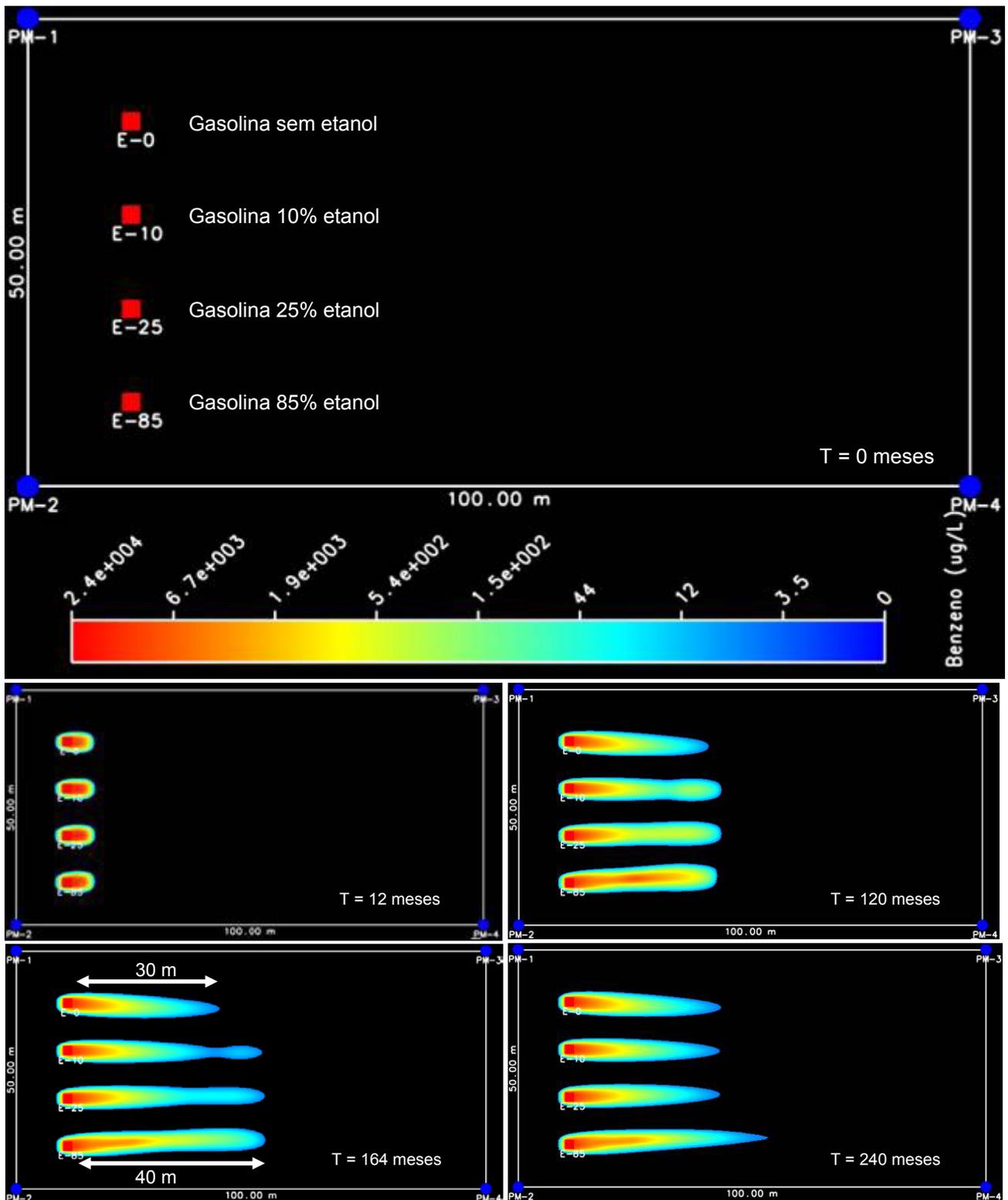


Figura 3. Resultados de simulação das plumas de benzeno em derramamentos de gasolina sem etanol, gasolinas E-10, E-25 e E-85. O tempo de meia-vida para o benzeno e o etano adotado para este cenário foi 0,3 e 1,0 ano, respectivamente.

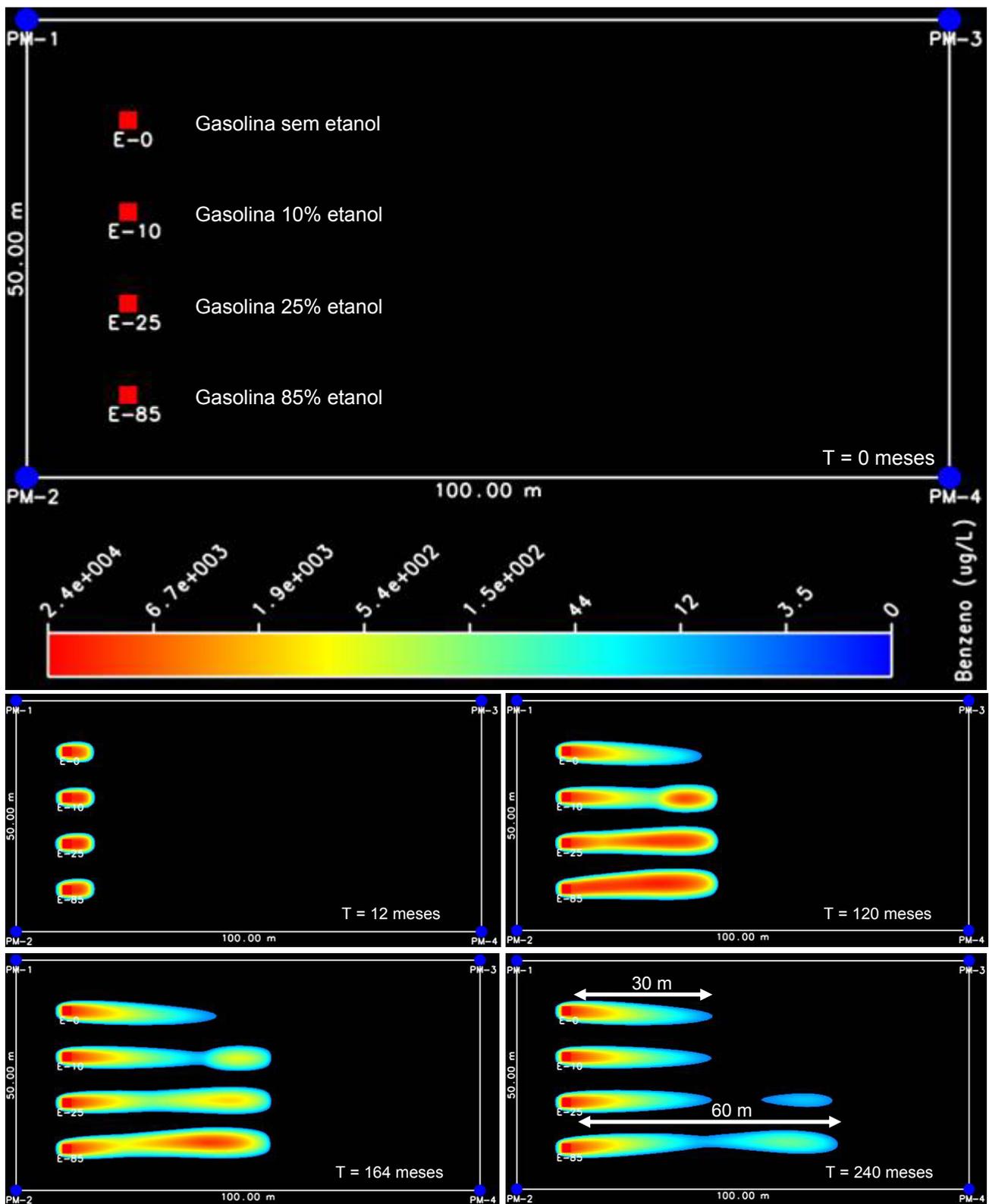


Figura 4. Resultados de simulação das plumas de benzeno em derramamentos de gasolina sem etanol, gasolinas E-10, E-25 e E-85. O tempo de meia-vida para o benzeno e o etanol adotado para este cenário foi 0,6 e 1,0 ano, respectivamente.

Para demonstrar a aplicação do SCBR para a definição de tecnologias de remediação em áreas impactadas foram simulados dois cenários envolvendo um derramamento de gasolina. Nestes dois cenários foram simulados formas de controles da migração da pluma de benzeno no início de um derramamento por meio de barreira impermeável e de bombeamento. O primeiro cenário consistiu na simulação de qual seria a melhor posição para a instalação de uma barreira física linear impermeável de forma a coibir a migração da pluma de contaminação no sentido do fluxo. Os resultados da simulação indicaram que a barreira física posicionada à jusante da fonte não seria uma boa opção, pois o fluxo da água subterrânea contorna a barreira e leva consigo a pluma de contaminação (Figura 5A). Alternativamente, foi simulada a colocação da barreira atrás da fonte (Figura 5B), o que se demonstrou ser eficaz para o controle da pluma. A barreira atrás da fonte impede que o fluxo da água subterrânea passe através do produto derramado e transfira os contaminantes para pluma. O segundo cenário simulado no SCBR foi a instalação de um poço de bombeamento com o objetivo de alterar o gradiente hidráulico e impedir o deslocamento da pluma no sentido natural (Figura 6). Por meio de simulações foi determinado que a taxa de bombeamento a ser aplicada para o cenário em questão deveria ser 0,5 L/s. Este tipo de simulação é de grande aplicação em casos reais de contaminação de águas subterrâneas, pois permite avaliar a eficácia da tecnologia empregada e determinar aspectos quantitativos da tecnologia como, por exemplo, número de poços de bombeamento necessários, número de bombas e vazão, extensão das barreiras e etc. A partir deste tipo de informação é possível estabelecer no plano de remediação o aporte de recursos necessários para sua execução.

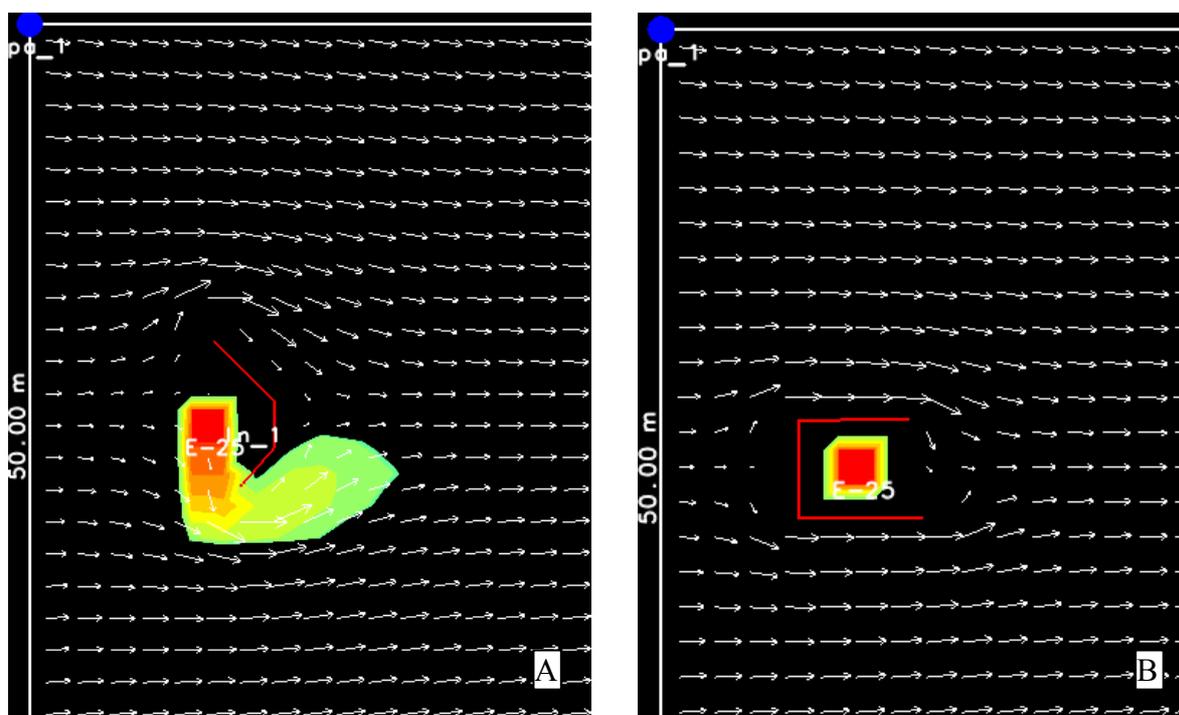


Figura 5. Demonstração da utilização de barreiras impermeáveis no controle de plumas de contaminação.

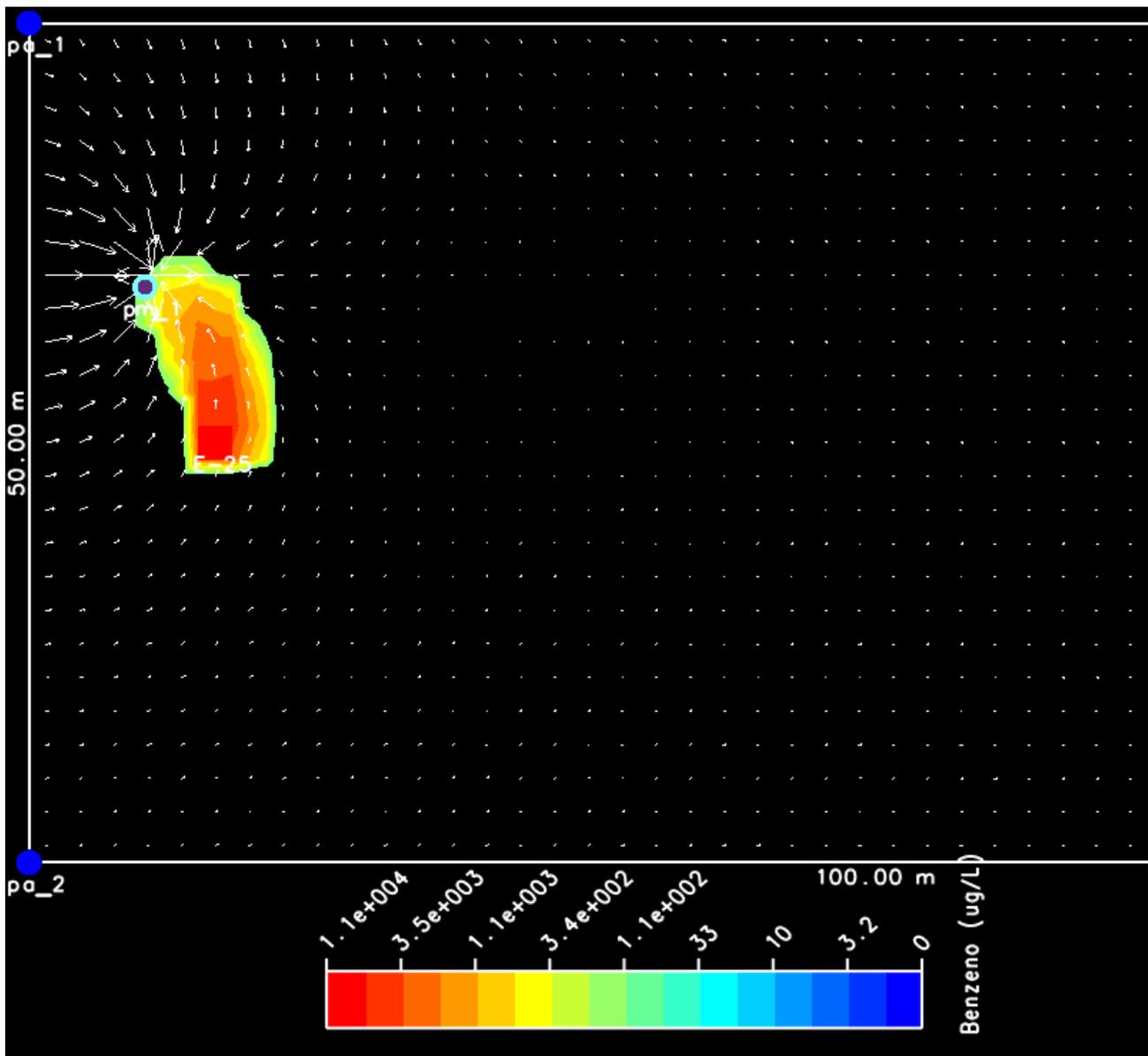


Figura 6. Demonstração da simulação de bombeamentos para mudança do gradiente hidráulico e controle da pluma de contaminação.

## 5 – Conclusões

Este trabalho apresentou as aplicações do modelo matemático Solução Corretiva Baseada no Risco (SCBR) para cenários de derramamentos de gasolina com e sem etanol e no controle da pluma de contaminação. As simulações com SCBR indicaram que podem haver diferenças significativas entre o comportamento das plumas de benzeno em derramamentos dos diversos tipos de gasolinas comercializadas no Brasil e no exterior, especificamente a gasolina sem etanol e as gasolinas E-10, E-25 e E-85. Foi observado que mesmo a presença de 10% de etanol na gasolina pode resultar em aumento dos comprimentos das plumas superiores a 30%, dependendo da cinética de biodegradação do etanol. No caso do derramamento da gasolina E-85 as altas concentrações de etanol podem ser tóxicas aos microorganismos, determinando uma cinética de biodegradação global

para a área menor do que em derramamentos de gasolina com 10% e 25% etanol. O aumento dos comprimentos das plumas em função da interferência do etanol pode trazer como consequência o aumento da probabilidade de um ponto de exposição (ex. poço de captação, rio ou lago) ser atingido pela contaminação. Estes resultados indicam a importância de se incluir na investigação ambiental de áreas impactadas por derramamentos de gasolina brasileira o monitoramento da concentração de etanol, além do monitoramento tradicional de contaminantes como os compostos BTEX e HPA.

Apesar de serem amplamente conhecidos os benefícios da gasolina com etanol para a minimização da poluição atmosférica, pouca atenção ainda é dada ao efeito do etanol sobre a contaminação das águas subterrâneas. Considerando tendência da incorporação dos biocombustíveis como o etanol na matriz energética mundial, torna-se ainda mais importante o conhecimento dos impactos do etanol em águas subterrâneas. Neste sentido o SCBR aplicado às áreas impactadas poderia auxiliar no entendimento dos efeitos do etanol na água subterrânea e na previsão de impactos potenciais dos mais diversos cenários de contaminação, incluindo diversas características hidrogeológicas e variadas misturas de gasolina com etanol.

## 6 – Propriedade e utilização

O SCBR possui pedido de registro no Instituto Nacional de Propriedade Industrial em nome da companhia Petrobrás S.A.. Sua aplicação vem sendo realizada em caráter experimental em áreas da Petrobrás, mas estão sendo estudadas alternativas para tornar o modelo disponível para o uso público. O modelo continua em desenvolvimento de forma a incluir de outras funcionalidades que auxiliem a avaliação de risco de áreas impactadas.

## 7 – Equipe de Desenvolvimento do SCBR

Prof. Dr. Henry X. Corseuil (UFSC), Eng. Dr. Márcio R. Schneider (UFSC), Eng. Erico Malamud (UFSC), Eng. M.Sc. Clovis Maliska Jr (ESSS), Eng. M.Sc. Fábio Zadrozny (ESSS), Eng. M.Sc. Rodrigo M. Lucianetti (ESSS), Eng. M.Sc. Tadeu Manuel, Eng. Mário do Rosário (CENPES/PETROBRAS).

## 8 – Referências

1. United Nations Environment Programme. Challenges to International Waters – Regional Assessments in a Global Perspective. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 2006.

2. Schnoor, J. L. Environmental modeling: fate and transport of pollutants in water, air and soil. 1<sup>a</sup> Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1995. 684p.
3. Michigan Department of Environmental Quality. Groundwater Modeling Program. Groundwater Modeling Guidance. Michigan, 2002.
4. Jacob Beara, Milovan S. Beljinb, and Randall R. Rossc. Fundamentals of Ground-Water Modeling. EPA/540/S-92/005. April, 1992.
5. Wendlander, E. Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em águas subterrâneas. São Carlos, SP : SBMAC, 2003. 95p.
6. Corseuil, H.X.; Kaipper, B.I.A; Fernandes, M. Cosolvency effect in subsurface systems contaminated with petroleum hydrocarbons and ethanol. Water Research, v.38, n.6, p.1449-1456, 2004.
7. Corseuil, H.X., Fernandes, M. Results of a natural atteuation experiment for na ethanol-blended gasoline spill. P. 24. In: Natural Atteuation and Gasoline Oxigenates, 2000, California. The international Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Goundwater. Anahein, California: Nov. 15-17, 2000. p. 24-31.
8. Fetter, C. W. Applied hydrogeology. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1994. 691p.
9. Maliska, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. 2<sup>a</sup> Ed., LTC, 2004. 453p.
10. Corseuil, H. X., Schneider, M. R., Rosário, M. Natural attenuation rates of ethanol and BTEX compounds in groundwater contaminated with gasohol. In: International Solid Waste Association, Istambul, 2002.