

MODELAMENTO NUMÉRICO DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COMO SUBSÍDIO PARA TOMADA DE DECISÕES COM BASE NO RISCO

Juliana Baitz Viviani¹; Ricardo Hirata¹ & Alexandre Maximiano²

Resumo – A aplicação do modelamento matemático do fluxo da água subterrânea no processo de Tomada de Decisões com Base no Risco propicia melhor alocação de recursos e otimização das medidas a serem empregadas em áreas impactadas. No entanto, poucos trabalhos foram publicados, no Brasil, com a utilização destas técnicas integradas.

Esse projeto foi desenvolvido em um auto posto localizado no Município de São Paulo, selecionado devido a vazamentos em seu sistema de armazenamento subterrâneo de combustível (gasolina e diesel).

O modelo numérico de fluxo da água subterrânea indicou que a pluma de contaminação dirige-se para a área residencial próxima ao empreendimento. Baseado neste cenário foi criado um modelo conceitual de exposição à contaminação, cujos principais receptores são os funcionários do auto posto e os moradores da área residencial.

Considerando os receptores mais críticos, verificou-se a viabilidade de implantação de duas alternativas para remediação da contaminação, simuladas com o modelo numérico MODFLOW em três dimensões: bombeamento e tratamento (“pump-and-treat”), com um poço em bombeamento a 20 m de profundidade e vazão de 50 m³/dia, e canal e portão (“funnel-and-gate”), com “paredes impermeáveis” de condutividade 1×10^{-10} m/s e 0,5 m de espessura, com cerca de 20 m de profundidade.

Abstract – The application of groundwater flow numerical modeling on the Risk-Based Decision Making (RBDM) process allows a better usage of resources and optimization of the measures to be taken on potentially impacted sites. However, there are few publications about the usage of the two techniques together in Brazil.

¹ LAMO – Laboratório de Modelos Físicos, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP), Rua do Lago 562, Cidade Universitária, São Paulo – SP, CEP 05508-080, Fone 55(11) 3091-4804, Fax 55 (11) 3091-4207, e-mail: jviviani@usp.br; hirata@usp.br

² Tecnohidro Projetos Ambientais S/C Ltda., Rua Padre Francisco Libermann 301, Vila São Francisco, São Paulo – SP, CEP 05353-160, Fone 55(11) 3765-2425, Fax 55(11) 3765-2099, e-mail: maximiano@tecnohidro.com.br

This project was developed in a gas station located in the Municipality of Sao Paulo, which was selected due to leakage occurred in its underground storage tanks (gasoline and diesel oil).

The groundwater flow numerical model indicated that the contamination plume heads towards the residential area next to the facility. Based on this scenery, a conceptual contamination exposure model was created, which determined as main contamination receptors the gas station workers and the residents of the area surrounding the contaminated area.

Considering the most critical receptors, the implementation of two remediation alternatives was simulated, with the three-dimensional numerical model MODFLOW: pump-and-treat, with a pumping well at the depth of 20 m and the rate of 50 m³/day, and the funnel-and-gate, with “impermeable walls” with the conductivity of 1×10^{-10} m/s and 0.5 m thick, with the depth of around 20 m.

Palavras-Chave – modelamento numérico de fluxo; RBDM; risco à saúde humana.

INTRODUÇÃO

Atualmente há inúmeros casos de contaminação do solo e das águas subterrâneas. Exigir do contaminador e da sociedade a remediação de todos os locais seria, além de extremamente custoso, pouco efetivo (Foster *et al.*, 2002[1]).

A Tomada de Decisões com Base no Risco (*Risk Based Decision Making* - RBDM) é um processo que consiste na avaliação de alternativas em uma área contaminada de acordo com o risco que cada local oferece à saúde humana e ao meio ambiente. Tal processo é extremamente útil em programas de ações corretivas em áreas onde há contaminação por falhas no sistema de armazenamento subterrâneo de combustíveis - SASC (U.S.EPA, 1995[2]; Oregon - DEQ, 1999[3]) ou quaisquer outros casos de contaminação por petróleo.

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo matemático de fluxo de água subterrânea que servisse como base para Tomada de Decisões com Base no Risco, no processo de gerenciamento ambiental de um posto de serviço localizado na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), que apresentou problemas de vazamento de combustíveis, bem como para subsidiar alternativas para a minimização e/ou eliminação desses riscos.

EMBASAMENTO TEÓRICO

Tomada de Decisões com Base no Risco (RBDM) é um processo que associa a caracterização do local e a avaliação de risco, buscando ações corretivas mais eficientes, levando em conta a

alocação de recursos e minimização do risco à saúde humana e ao meio ambiente. Tais metodologias têm sido aplicadas desde o início da década de 90 no gerenciamento ambiental de vazamentos de combustíveis derivados de petróleo, sobretudo nos EUA (Maximiano, 2001[4]).

O U.S. Environmental Protection Agency's Office of Underground Storage Tanks (U.S.EPA-OUST) criou uma política geral para utilização do processo de RBDM em locais contaminados a partir de falhas no SASC (U.S.EPA, 1995[2]) e tem incentivado os órgãos ambientais regionais a utilizarem-na para a aplicação de ações corretivas e adaptá-la às suas realidades (Oregon-DEQ, 1999[3]; Texas NRCC, 1994[5] e Illinois Environmental Protection Agency, 1994[6], dentre outros).

Há poucos trabalhos científicos desenvolvidos na área de RBDM no Brasil, apesar da larga utilização da metodologia por empresas de consultoria ambiental. Entre eles pode-se citar o de Kolesnikovas (1997[7]), que caracterizou os riscos representados pelo armazenamento e manuseio de combustíveis sobre linhas do metrô na cidade de São Paulo e o de Maximiano (2001[4]), que aplicou a metodologia RBCA para a cidade de São Paulo, visando a determinação de níveis aceitáveis para hidrocarbonetos no ambiente específicos para a área de estudo.

CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), onde está localizada a área de interesse, encontra-se sobre terrenos sedimentares de idade cenozóica, compreendendo os depósitos terciários da Bacia de São Paulo e as coberturas aluviais recentes, de idade quaternária, encontradas ao longo dos principais rios da região. Os terrenos cristalinos contornam as áreas sedimentares e configuram praticamente toda a borda da RMSP (SABESP/CEPAS/IG-USP, 1994[8]).

No contexto hidrogeológico, os sedimentos da Bacia de São Paulo, assentados discordantemente sobre o substrato cristalino, constituem dois grandes sistemas aquíferos distintos da Bacia do Alto Tietê – BAT, subdivididos por Hirata & Ferreira (2001)[9] em quatro unidades, que até então, eram agrupados apenas como aquíferos Cristalino e Sedimentar (DAEE, 1975[10]), respectivamente os aquíferos de Rochas Metamórficas e Granitóides e os aquíferos São Paulo e Resende.

A área de estudo encontra-se na borda da Bacia de São Paulo, onde há uma pequena espessura da capa sedimentar da Formação Resende sobre o embasamento cristalino alterado.

CARACTERIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES E OPERAÇÃO DO AUTO POSTO

O auto posto vem apresentando, desde outubro de 1993, problemas de vazamentos em seu SASC, tanto de gasolina quanto de óleo diesel. Por algumas vezes, foi bombeada a fase livre existente. Após a retirada da fase livre, foram realizadas análises químicas na água dos poços de monitoramento existentes, indicando a presença de fase residual de combustível. Foi realizada avaliação de risco Tier 2 a pedido da CETESB, no ano de 2001. O benzeno apresentou-se em concentrações acima do limite aceitável de risco, para inalação em ambientes fechados e contato dérmico para os cenários dos residentes vizinhos do auto posto. As metas de remediação indicadas para a área em questão foram de, respectivamente, 5,45 mg/L e $1,83 \times 10^{-1}$ mg/L.

O auto posto possui área total de cerca de 21.000m², onde funcionam uma plataforma de abastecimento, sanitários públicos, loja de produtos automotivos, área de troca de óleo, borracharia e restaurante, com acesso livre para pedestres, moradores locais e veículos de carga e passeio (Figuras 1 e 2).



Figura 1 - Localização da área.

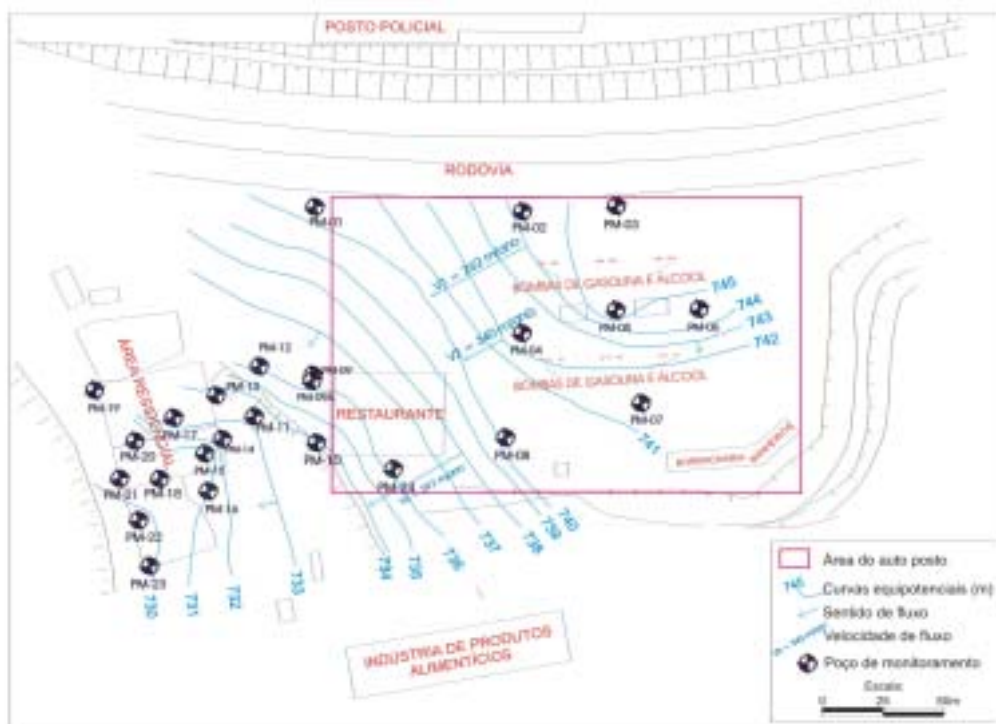


Figura 2 - Uso e ocupação da área de estudo.

MODELO CONCEITUAL DA ÁREA

Modelo Conceitual de Fluxo de Água Subterrânea

O modelo conceitual foi elaborado com base nos perfis e nos dados coletados nos poços de monitoramento existentes na área. Tais poços foram construídos por três empresas de consultoria ambiental diferentes, apresentando uma grande heterogeneidade de detalhamento de informações. Dos 24 poços existentes, foram encontrados apenas as informações de 21, a partir dos quais foi possível extrair os dados listados na tabela a seguir.

Tabela 1 - Unidades hidroestratigráficas do modelo conceitual da área.

Unidade Hidro-estratigráfica	Descrição Litológica	Espessura média (m)	*K (m/s)	**n	**n _{ef}
1 (areia argilosa)	Areia fina argilosa branca a amarelada, variando para argila arenosa e areia média a grossa, argilosa, de coloração marrom/avermelhada. Tal unidade compõe a porção basal de alguns poços de monitoramento (os de cota mais baixa) e, desta maneira, foi extrapolada até o contato com o embasamento. Engloba também o aterro.	50 – 60	6,91 x 10 ⁻⁸ (rebaixamento) 8,93 x 10 ⁻⁷ (recuperação)	0,52	0,13
2 (argila)	Argila homogênea, ocasionalmente siltosa, localmente com feldspato caulinzado.	2,5	1,14 x 10 ⁻⁵ (rebaixamento) 9,67 x 10 ⁻⁶ (recuperação)		
3 (silte areno-argiloso)	Silte areno-argiloso, medianamente compacto a muito compacto, micáceo, de coloração variada (roxo, acinzentado).	4 – 25	1,44 x 10 ⁻⁵ (rebaixamento) 1,40 x 10 ⁻⁵ (recuperação)		
4 (argila areno-siltosa)	Lentes decimétricas de argila areno-siltosa a silto-arenosa, silte argiloso, com grau de compactação variado, de coloração avermelhada a marrom clara, intercalada na unidade 3.	2	1 x 10 ⁻⁵ (aprox. igual às unidades 2 e 3)		

* Condutividade hidráulica: slug tests

**porosidade total (n) e efetiva (n_{ef}): análises realizadas no Laboratório de Física de Solos do IPT

MODELO MATEMÁTICO

O programa escolhido para o modelamento matemático do fluxo da água subterrânea foi o MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988[11]) e, para o caminhamento de partículas, o MODPATH (Pollock, 1989[12]), utilizados com o auxílio do Visual MODFLOW (Guiguer & Franz, 1996[13]).

A área escolhida para o modelamento tem 1 km² ao redor do auto posto (Figura 1).

O domínio do modelo foi estabelecido com base nas características geológicas e hidrogeológicas determinantes para o fluxo subterrâneo, não se restringindo à área do auto posto, sendo estendido até feições como divisores de água (interpretados como coincidentes com o divisor de água subterrânea) e corpos d'água superficiais.

A grade do modelo inicialmente foi definida em intervalos regulares de 20 m em ambos os eixos (x e y). Para a área do auto posto, onde estão concentradas as informações, a malha foi refinada, chegando em alguns pontos a espaçamento de 2,5 m.

A topografia original do terreno, representada no mapa 1:10.000 da EMPLASA, foi modificada a partir de terraplenagem, o que foi considerado na construção do modelo conceitual e na interpretação matemática das unidades geológicas.

O número de camadas do modelo foi definido com base nas camadas hidroestratigráficas definidas para a área no modelo conceitual, como ilustrado na Figura 3 (exemplo para seção local).

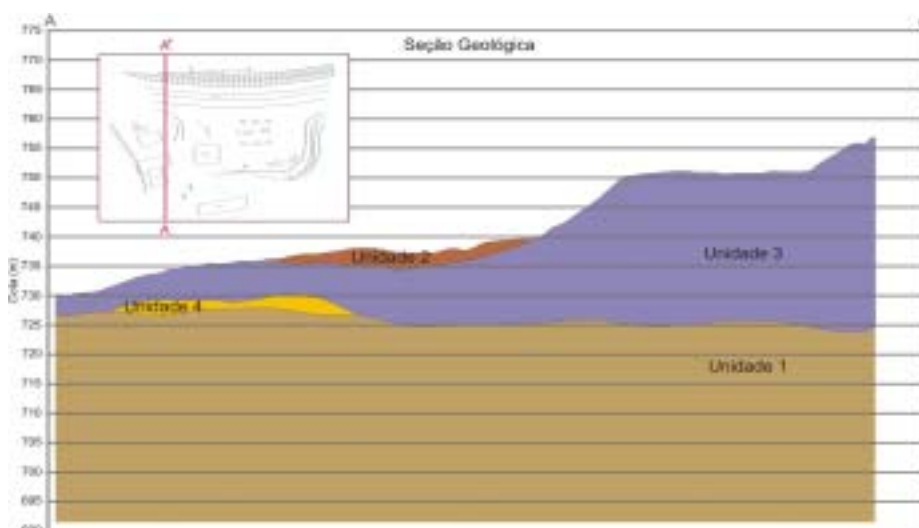


Figura 3 - Seção geológica e unidades hidroestratigráficas.

Assim sendo, foram definidas 4 camadas, com os seguintes parâmetros hidráulicos:

- Camada 1: representa a Unidade hidroestratigráfica 3 e lentes superficiais das unidades 2 e 4;
- Camada 2: também representa a Unidade hidroestratigráfica 3 e lentes das unidades 2 e 4;
- Camada 3: representa a Unidade hidroestratigráfica 3, abaixo das lentes intercaladas das unidades 2 e 4;
- Camada 4: representa a Unidade hidroestratigráfica 1.

As superfícies que limitam as camadas foram definidas com base nos contatos interpretados no modelo conceitual. O topo da camada 1 representa a superfície do terreno (confeccionada a partir de mapas topográficos em escala 1:10.000 e, na região de interesse, corrigido em escala 1:1.000). No caso da base da camada 4, que é o topo do embasamento, foi utilizada a média calculada por Takiya (1991[14]) para o seu Domínio 3, região onde se insere a área estudada, que é de 661m. O topo do embasamento, considerado impermeável, corresponde à base do modelo.

Ao compilar o modelo no software Visual MODFLOW, foi necessário a subdivisão das camadas (3 e 4) em 8 novas camadas, resultando num total de 69 linhas, 72 colunas e 10 camadas, somando 49.680 células.

As unidades hidráulicas do modelo matemático representaram as unidades hidroestratigráficas do modelo conceitual. Assumiu-se que as unidades hidráulicas tivessem caráter isotrópico nos eixos horizontais x e y ($k_x = k_y$), e anisotrópicas em relação ao eixo vertical z, considerando que a sedimentação das unidades imprime uma condutividade hidráulica mais baixa na vertical. Adotou-se o valor de $k_x = k_y = 0,1 k_z$ (Iritani, 1998[15]; Figura 4).

Tabela 2 - Parâmetros hidráulicos do modelo matemático.

<i>Unidade Hidráulica</i>	<i>Correspondente hidroestratigráfica</i>	k_x (m/s)	k_y (m/s)	k_z (m/s)	S_y	n	n_{ef}
1	3	$1,5 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-6}$	0,13	0,52	0,13
2	2	7×10^{-6}	7×10^{-6}	7×10^{-7}	0,13	0,52	0,13
3	4	5×10^{-6}	5×10^{-6}	5×10^{-7}	0,13	0,52	0,13
4	1	9×10^{-6}	9×10^{-6}	9×10^{-7}	0,13	0,52	0,13

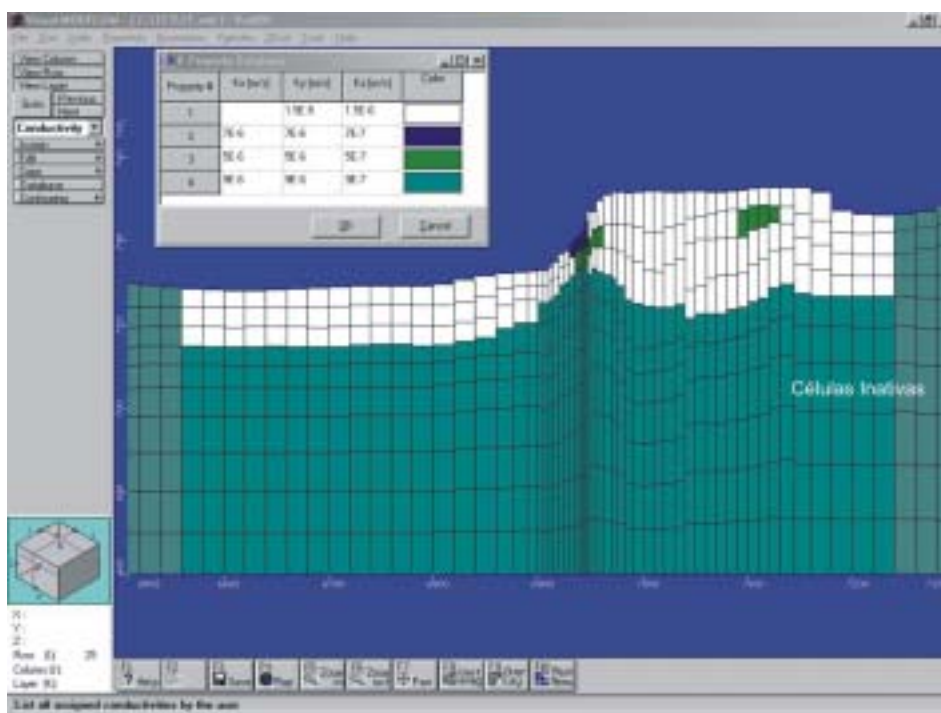


Figura 4 - Unidades hidráulicas do modelo matemático.

Condições de Contorno

As condições de contorno estabelecidas para a área encontram-se representadas na Figura 5.

A área é caracterizada por um relevo bastante irregular. A norte da área, há um córrego afluente do rio Tietê, que foi considerado como condição de contorno tipo carga constante (variando, conforme a topografia, de 768 m a 726,5 m na porção mais baixa).

A oeste e sul da área há diversos lagos, que foram considerados como áreas de descarga do sistema de água subterrânea e simulados, assim como a drenagem existente a oeste da área, como drenos, com elevação de 725 m, onde se assumiu valores de condutância de 20.000 m²/dia, garantindo que toda a água que chegasse ao dreno fosse efetivamente capturada, embora os valores de condutância calculados (com base na metodologia recomendada por Guiguer & Franz, 1990[13]) para os drenos da área resultassem em 5200m²/dia. Imediatamente a jusante dos drenos, foi assumida uma carga constante de 725 m, que corresponde à carga apresentada pelos lagos e proporcional à carga do rio Tietê, localizado a cerca de 500 m destes lagos.

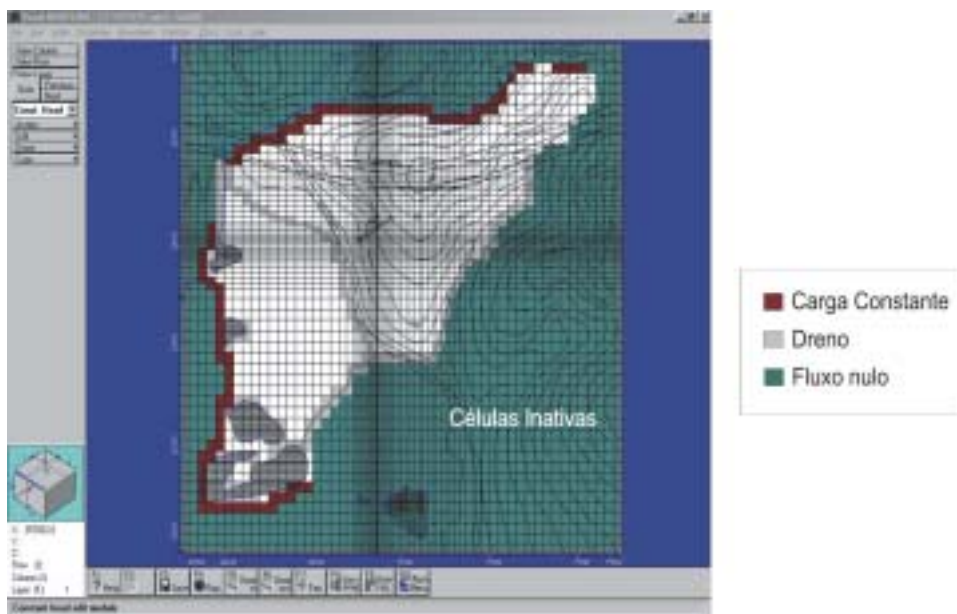


Figura 5 - Condições de contorno do modelo matemático (Camada 1).

A porção leste da área modelada está delimitada por um córrego que foi simulado no modelo como condição de contorno tipo dreno. Para o dreno relativo ao córrego, assim como para o caso dos lagos, assumiu-se o valor de condutância como 20.000 m²/dia, e elevação variando de 750 m, na porção mais alta, a 725 m, onde deságua em um dos lagos.

Além das condições de contorno relativas às características naturais do terreno, foi necessário atribuir-se condições adicionais, relativas à intervenção antrópica na área. Com a terraplenagem da área do auto posto, a jusante desta (montante da área residencial) foi implantado sistema de drenagem da água subterrânea, que foi considerado no modelo matemático, com três drenos: dois equivalem ao talude construído ao redor da área do posto, representando o sistema propriamente dito (um na base, com elevação de 733,5 m a 727 m, e outro no topo do talude, com 738 m a 731 m); o terceiro equivale a um canal artificial existente a jusante da estrada da área residencial, paralelo a esta (elevação de 726 m a 725,5 m), todos com valor de condutância de 20.000 m²/dia.

Considerando a pavimentação do local, que tem predominância de bloquetes e gramado, tem-se que a infiltração, calculada pela razão entre a taxa de infiltração e a precipitação simulada, varia de 8,5% a 11% (bloquetes) e 16% a 17% (gramado) em relação à pluviometria (CADES, 2001)[16]. Deste modo, o valor de recarga para a área seria equivalente a um valor entre 120 e 240 mm/ano.

Calibração do Modelo Matemático

O modelo foi calibrado para a situação sem bombeamento, que é a natural da área. Para a calibração do modelo numérico foram utilizados os dados dos poços de monitoramento localizados na área. Dos 24 poços existentes somente foi possível o acesso e medição de 19 poços.

Considerou-se o modelo calibrado quando o valor da porcentagem de resíduo ($\%_{\text{resíduo}} = \text{RMS}/\Delta H$, ou seja, a proporção entre as diferenças das cargas observadas e calculadas e a variação total da carga hidráulica do sistema) foi menor que 10% (Figura 6).

Tabela 3 - Resíduos do modelo calibrado.

<i>Resíduo</i>	<i>Resultado</i>
ME (m)	-0,310
MAE (m)	0,899
RMS (m)	1,418
% resíduo	8,943

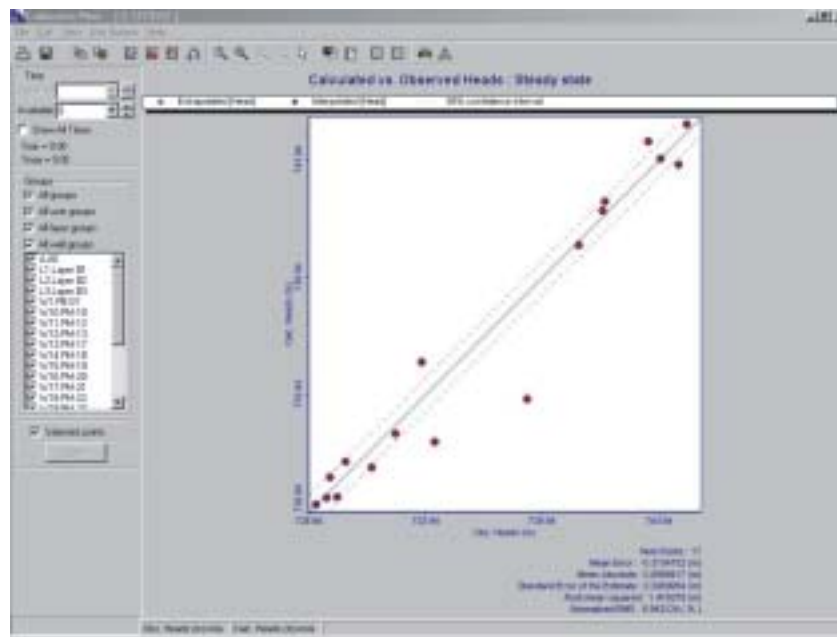


Figura 6 - Calibração do modelo matemático.

Análise de Sensibilidade

O objetivo da análise de sensibilidade de um modelo numérico é verificar a influência de cada parâmetro nos valores calculados pelo mesmo. Para isso, os parâmetros do modelo foram variados em 0,5 e 1,5 vezes o adotado para a melhor calibração, baseado no trabalho de Iritani (1998)[15].

Foi observado que qualquer situação que provocasse um aumento da quantidade de água no modelo provocava a não convergência do mesmo, ou seja, o modelo é sensível à quantidade de água no sistema (Tabela 4).

Tabela 4 - Análise de sensibilidade do modelo.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variã o</i>	<i>ME</i>	<i>MAE</i>	<i>SEE</i>	<i>RMS</i>	<i>%resíduo</i>
Condutividade hidráulica (k)	1,5 k	-0,369	0,908	0,344	1,426	8,99
	0,5 k	não convergiu				
Recarga (R)	1,5 R	não convergiu				
	0,5 R	-0,399	0,913	0,344	1,432	9,026
Condutância dos drenos (C)	1,5 C	-1,269	1,327	0,409	1,901	11,985
	0,5 C	não convergiu				

MODELO CONCEITUAL DE EXPOSIÇÃO

A contaminação da área do auto posto está relacionada ao solo superficial, à zona não saturada e à água subterrânea. Para a criação do modelo conceitual de exposição para a área do auto posto de acordo com a finalidade deste trabalho, o único caminho de exposição considerado foi a água subterrânea. Caminhos de exposição são aqueles pelos quais o contaminante sai da fonte e chega até um receptor identificado, gerando uma situação potencial de risco (Maximiano, 2001[4]).

A fonte de contaminação estaria localizada próximo ao poço PM-05 (Figura 7). Deste modo, foi simulado o caminhamento de partículas hipotéticas, situadas próximo deste poço, com o auxílio do modelo matemático, para a determinação dos principais receptores da contaminação.

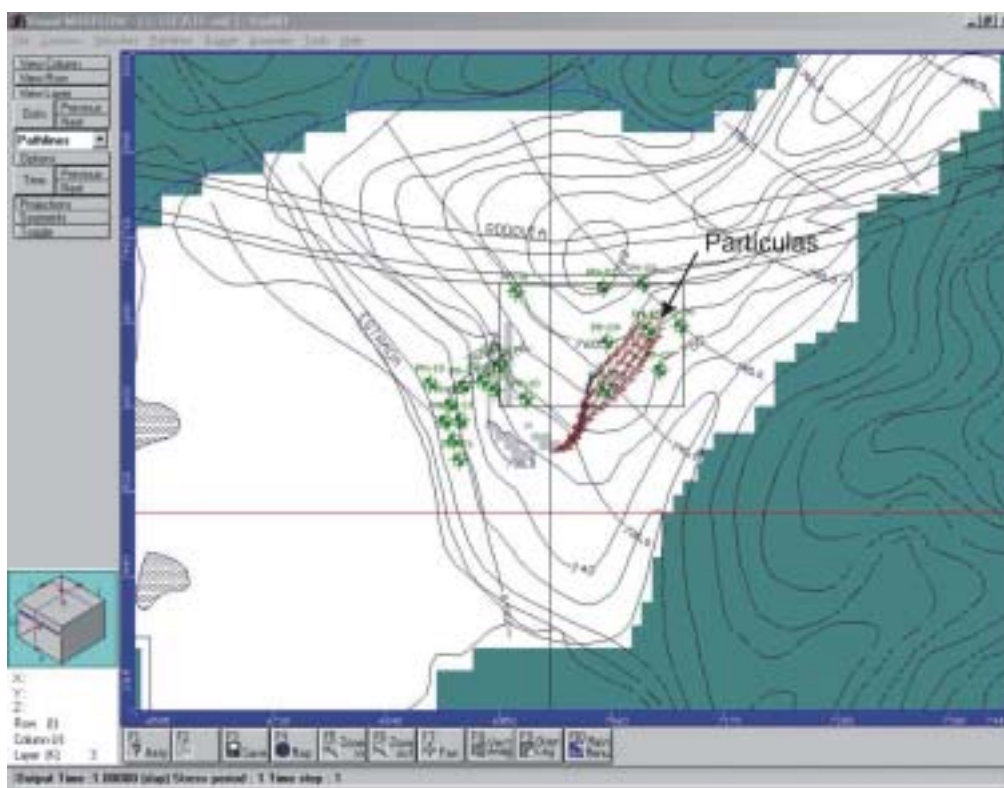


Figura 7 - Modelo calibrado com caminhamento de partículas.

O caminhamento das partículas indicou que a contaminação que acompanha o fluxo da água subterrânea dirige-se para a área residencial e todas elas afloram nos drenos das encostas do morro terraplenado, não passando além deste (Figura 7). Este direcionamento das partículas permitiu o delineamento do modelo conceitual de exposição à contaminação da área.

Os principais receptores e vias de ingresso, considerando o caminho de exposição água subterrânea, são os seguintes:

- Externos à área do auto posto:
 - Moradores da área localizada a jusante do posto, inalando vapores provindos da água subterrânea, em ambientes abertos e fechados, ingerindo e em contato dérmico com água subterrânea contaminada;
- Internos à área do auto posto:
 - Frentistas, funcionários e clientes do posto inalando vapores provindos da água subterrânea, em ambientes abertos e fechados;
 - Funcionários e clientes do restaurante, inalando vapores provindos da água subterrânea, em ambientes abertos e fechados.

Neste contexto, a situação mais crítica de exposição para cenários fora do posto seria a dos moradores da área residencial, e, internos, os frentistas e funcionários do auto posto e do restaurante, uma vez que potencialmente estão expostos durante um maior período de tempo à contaminação. Os cenários de exposição encontram-se representados na Figura 8.

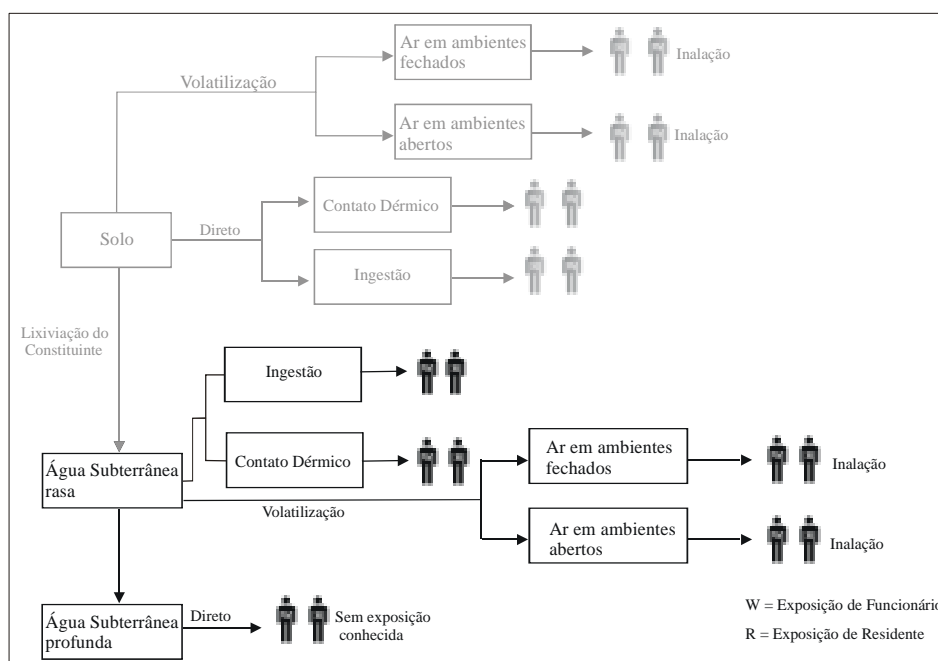


Figura 8 - Cenários de exposição. Os cenários em cinza não foram considerados para a finalidade deste modelo.

SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS DE REMEDIAÇÃO

Sistema “pump-and-treat”

A primeira opção de remediação simulada foi o sistema de bombeamento (através de poços de bombeamento simples) e tratamento, capturando a pluma na água subterrânea, visando prevenir migrações futuras e removê-la para tratamento. Deste modo, o modelo numérico permite a determinação da efetividade operacional máxima do sistema, pela seleção da locação de poços de bombeamento simples, que capturarão e removerão a pluma da água subterrânea e o prognóstico, pela simulação, de uma taxa de bombeamento ótima que maximize a eficiência operacional do sistema.

Para verificar a eficiência do modelo, a atenção é dada às partículas, que devem ser, ao máximo, capturadas pelo cone de rebaixamento provocado pelos poços em bombeamento. O sistema simulado para o modelo numérico desta área mostrou ser plenamente viável. A situação em que provocou a captura da pluma foi para uma vazão de a partir de 50 m³/dia, para um poço em bombeamento instalado a 20 m de profundidade. A configuração do melhor sistema pode ser observada na Figura 9.

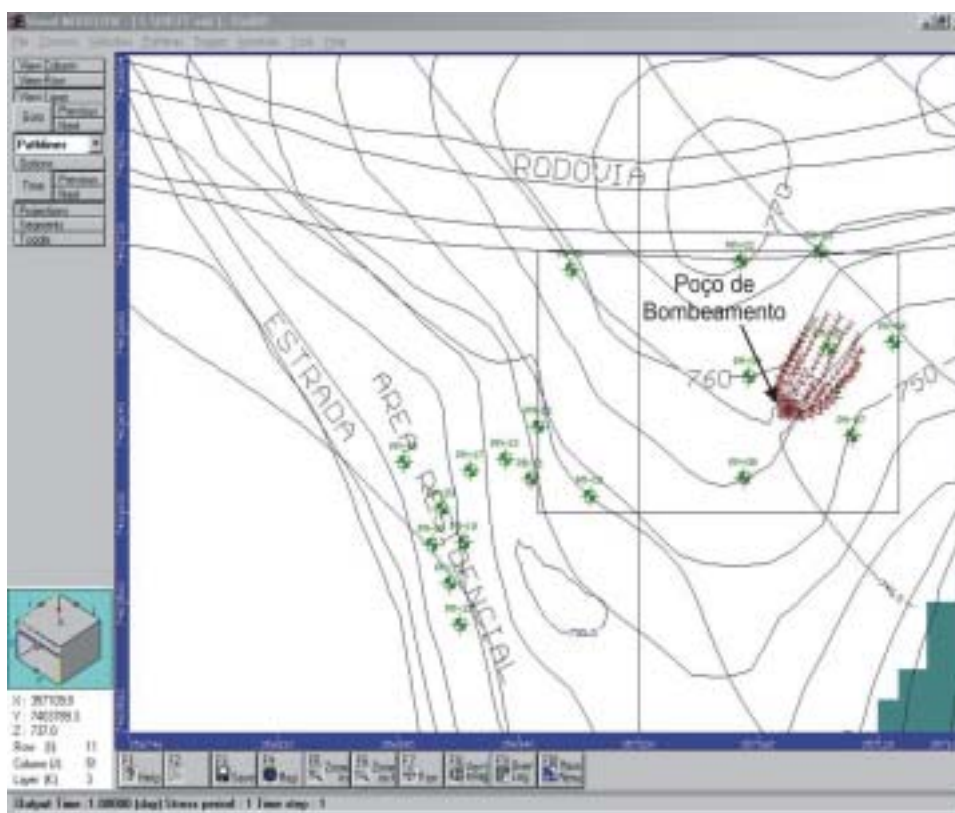


Figura 9 - Simulação do sistema “pump-and-treat”.

Sistema “funnel-and-gate”

Outra opção de remediação simulada foi a tecnologia de tratamento por parede para a descontaminação “*in situ*” para a água subterrânea contaminada.

O sistema de canal e portão (“funnel-and-gate”) está embasado na tecnologia de tratamento por paredes. O sistema utiliza paredes de baixa permeabilidade para afunilar a pluma contaminante, redirecionando sua migração através da zona de tratamento (Starr and Cherry, 1994[17]). A figura abaixo ilustra alguns tipos de sistema “funnel-and-gate”.

Tal sistema de remediação, porém, provoca a mudança na direção e no gradiente de fluxo, resultando em propagação imprevista da água subterrânea tanto na direção horizontal como na vertical. Tais efeitos podem ser visualizados no modelo Visual MODFLOW, antes da construção do sistema de remediação.

A simulação deste sistema utilizando o modelo numérico demonstrou que é plenamente exequível. Para a simulação do método foram utilizados “muros” (Walls), condições que estão disponíveis no MODFLOW, de 0,5 m de espessura, com cerca de 20 metros em profundidade. A condutividade assumida para o muro é de 1×10^{-10} m/s. O muro provocou o afunilamento da pluma (representada pelas partículas), o que permitiria a implantação de um sistema de remediação na saída do canal (“funnel”, Figura 10).

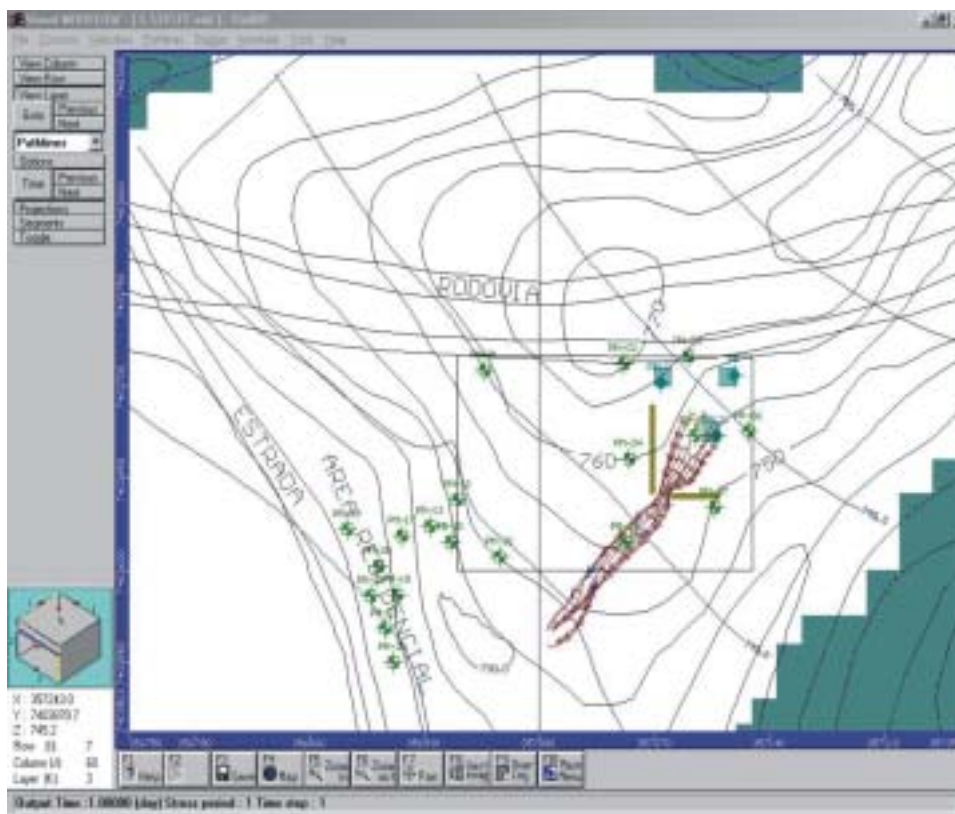


Figura 10 - Simulação do sistema “funnel-and-gate”.

CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu concluir que o modelo numérico construído corresponde à melhor representação encontrada para a área, dentro das tentativas realizadas.

A simulação do caminhamento de partículas com o uso do modelo numérico da área permitiu verificar que o fluxo, que leva a contaminação, se dá na direção da área residencial a partir do PM-05, próximo do qual está a fonte da contaminação (de ENE para WSW), e que os principais receptores da contaminação relativa ao caminho de exposição água subterrânea (enfocado neste trabalho) seriam os funcionários do auto posto e do restaurante (internos ao auto posto) e os moradores da área residencial (externos ao auto posto).

Para evitar que esta pluma atinja seus receptores mais críticos, foram simuladas duas situações de remediação: o sistema “pump-and-treat” (bombeamento e tratamento) e o sistema “funnel-and-gate” (canal e portão). Ambos os sistemas apresentaram-se viáveis de serem aplicados.

Com base no modelamento, foi possível definir quais as características construtivas e de manutenção dos sistemas (taxa e locação dos poços de bombeamento e espessura, largura e profundidade do muro). Neste caso, a avaliação dos custos de implantação de cada método complementaria o estudo.

Assim sendo, conclui-se que a ferramenta de modelamento numérico de fluxo de água subterrânea é muito importante na alocação de recursos em métodos de remediação. Desta forma, a decisão do melhor sistema a ser adotado pode ser tomada antes da tentativa de implantação *in situ*, que poderia causar um gasto desnecessário em um sistema ineficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CADES – Conselho Municipal do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Prefeitura do Município de São Paulo. Resolução nº 66 de 2001 do Conselho Municipal do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Prefeitura do Município de São Paulo.[16]
- [2] DAEE – Depto. de Águas Subterrâneas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (1975) Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 1. Gde. São Paulo. DAEE, São Paulo. 3v.[10]
- [3] Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D’Elia, M.; Paris, M. (2002) Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. 1^a ed. Washington, D.C, The World Bank. 103p.[1]
- [4] Guiguer, N; Franz, T. (1990) Visual MODFLOW User’s manual. WHI, Canadá. 231p. [13]

- [5] Hirata, R.; Ferreira, L. M. R. (2001) Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31, n. 1, p. 43-50.[9]
- [6] Illinois Environmental Protection Agency (1994) The Illinois Leaking Underground Storage Tank Program: A Summary of Recent Developments, October 1994.[6]
- [7] Iritani, M. (1998) Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea. São Paulo, 200 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.[15]
- [8] Kolesnikovas, C. (1997) Caracterização dos riscos representados por armazenamento e manuseio de combustíveis sobre linhas do metrô em São Paulo-SP. São Paulo, 90 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.[7]
- [9] Maximiano, A. M. de S. (2001) Determinação de níveis aceitáveis no ambiente para hidrocarbonetos utilizando o procedimento de Ações Corretivas Baseadas no Risco (RBCA). Aplicação para a cidade de São Paulo. São Paulo, 121 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.[4]
- [10] McDonald, M. G.; Harbaugh, A. W. (1988) A modular three dimensional finite-difference ground-water flow model. *Techniques of Water-Resources Investigations of U. S. Geological Survey*, 06-A1, USGS, Washington, EUA. 576 p.[11]
- [11] Oregon DEQ – Department of Environmental Quality (1999) Risk-Based Decision Making for the Remediation of Petroleum-Contaminated Sites. Waste Management & Cleanup Division, Underground Storage Tank Program, State of Oregon, DEQ. 38p.[3]
- [12] Pollock, D. W. (1989) Documentation of computer programs to complete and display pathlines using results from the U. S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water model. USGS, Open File Report 89-381, 81p.[12]
- [13] SABESP/CEPAS/IG-USP (1994) Diagnóstico Hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo. Relatório Final – IGc-USP. 115p.[8]
- [14] Starr, R.C.; Cherry, J.A. (1994) In-situ remediation of contaminated ground water-The funnel-and-gate system; *Ground Water*, v. 32, p. 465-476.[17]
- [15] Takiya, H. (1991) Aplicação de métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo. São Paulo, 109p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.[14]
- [16] Texas NRCC - Natural Resource Conservation Commission (1994) Risk-Based Corrective Action for Leaking Storage Tank Sites. RG-36, January 1994.[5]

- [17] U.S.EPA – U. S. Environmental Protection Agency (1995) Use of Risk-Based Decision Making in UST Corrective Action Programs. OSWER Directive 9610.17. Office of Underground Storage Tanks. 18p.[2]