



Copyright 2005, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

ESTUDO DE CASO DO FLUXO HÍDRICO E CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA POR DERIVADOS DE PETRÓLEO NA REGIÃO DO PORTO DO MUCURIBE – FORTALEZA/CE

Celme Tôrres Costa¹, Marco Aurélio H. da Castro²

¹ Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Bl 713 – Fortaleza/CE, celme@deha.ufc.br

² Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Bl 713 – Fortaleza/CE, marco@ufc.br

Resumo – Neste foi realizado um estudo de caso para simular o fluxo hídrico subterrâneo e a contaminação por derivados de petróleo, causada por uma suposta contaminação na zona do aquífero costeiro na área do Porto do Mucuripe – Região Metropolitana de Fortaleza, mais especificamente por compostos BTEX, utilizando uma metodologia numérico-analítica. A metodologia utiliza um tratamento misto para problemas transientes: numérica no que diz respeito ao espaço e analítica em relação ao tempo. A principal vantagem desse tipo de solução em comparação com a conhecida solução exclusivamente numérica é que não existe a necessidade de se otimizar a relação entre o intervalo de tempo escolhido e o espaçamento entre os nós da malha. A solução é dada através de expressões matemáticas para cada nó de uma malha de elementos finitos, tendo o tempo como variável independente. Os resultados apresentados mostram a aplicabilidade do MNA na previsão de cenários de contaminação das águas subterrâneas fornecendo valores confiáveis quando se está de posse de dados de campo que configurem com fidelidade os casos reais. Conclui-se que uma possível contaminação da área da região do Porto do Mucuripe, por compostos BTEX, acarreta comprometimento da qualidade das águas subterrâneas em níveis bastante elevados.

Palavras-Chave: Modelagem; Compostos BTEX; Contaminação.

Abstract – In this a case study was accomplished to simulate the groundwater flow and the contamination for derived of petroleum, caused by a supposed contamination in the area of the coastal aquifer in the area of Mucuripe Port - Metropolitan Area of Fortaleza, specifically for composed BTEX, using a numeric-analytical methodology (MNA). The methodology uses a mixed treatment for transient problems: numeric in what the concerns the space and analytical on the time. The main advantage of that solution in comparison with the known solution exclusively numeric it is that the need doesn't exist of optimizing the relationship between the interval of chosen time and the spacing among of the mesh. The solution is given through mathematical expressions for each knot of a mesh of finite elements, tends the time as independent variable. The presented results show the applicability of MNA in the forecast of sceneries of contamination of the underground waters supplying reliable values when it is been in possession of field data that configure with fidelity the real cases. It is ended that a possible contamination of the area of the study, for composed BTEX, compromising of the quality of the underground waters in quite high levels.

Keywords: Modeling, BTEX composed, Contamination.

1. Introdução

A região do Porto de Fortaleza ou Porto do Mucuripe situa-se na enseada do Mucuripe, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), capital do estado do Ceará. A região portuária concentra atividades que envolvem diferentes segmentos da cadeia produtiva e comercial do setor petrolífero, desde o transporte de óleo até as unidades de refino da LUBNOR – Refinaria da Petrobras, bem como a distribuição e comercialização de combustíveis e derivados de petróleo das empresas SHELL, TEXACO, ESSO, IPIRANGA, AGIP, SP, NGB, entre outros produtos. A PETROLUSA, também instalada na área, produz fluidos de freios e aditivos para radiador utilizando como matéria-prima produtos petroquímicos como tolueno, xileno, álcool, monoetileno glicol e dietileno-glicol, dentre outros. Estas operações oferecem um risco ao meio ambiente e a qualidade natural das águas subterrâneas, que servem a indústria e a população local, principalmente em épocas de seca, quando estes recursos tornam-se uma reserva estratégica para o município. Tendo em vista a quantidade de atividades potencialmente contaminantes existente na área em estudo, torna-se indispensável o conhecimento do comportamento de uma possível contaminação através da previsão de cenários. A contaminação por derivados de petróleo leves (LNAPL), como os que circulam na região do Porto do Mucuripe, tem se tornado um grande problema ambiental, não pelo volume individual da contaminação, mas pelo caráter sistêmico que representam e pela repercussão que geram sobre a qualidade da água dos aquíferos. Prever cenários que caracterizem este tipo de contaminação é fundamental para orientar as atividades de prospecção de água subterrânea e diagnóstico dos impactos gerados. Suas consequências imediatas são o comprometimento da qualidade das águas subterrâneas que, a depender do grau de contaminação, inutilizam completamente o aquífero devido a impraticabilidade técnica e aos altos custos das técnicas de remediação. Com estes cenários, será possível a determinação das possíveis zonas de contaminação, do tempo de propagação, extensão e direção da pluma de contaminante. Com base no conjunto de dados geológicos e hidrogeológicos, o estudo de caso tem como objetivo principal simular o comportamento do fluxo hídrico subterrâneo e a contaminação por derivados de petróleo, causada por uma suposta contaminação na zona do aquífero costeiro na Região do Mucuripe, aplicando um modelo numérico-analítico.

2. Problemática Ambiental

A estrutura da indústria petrolífera é composta por uma série de etapas, desde as atividades de upstream (exploração e produção) até as atividades de downstream (transporte, refino, distribuição e comercialização). Na região portuária e industrial do Mucuripe encontram-se todas as atividades relacionadas à etapa de downstream. Na área em estudo, os derivados de petróleo, na sua grande maioria gasolina, das empresas Shell, Texaco, Esso, Ipiranga, Agip, SP, são estocados em tanques de armazenamento. A unidade UD – LUBNOR, utiliza o petróleo Bachaquero na produção de lubrificantes naftênicos básicos, cimento asfálticos de petróleo (CAP) e asfaltos diluídos.

Em função da grande quantidade de produtos derivados de petróleo que circulam e são estocados na região do Porto do Mucuripe e considerando o grau de vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos (dunas/paleodunas) que possuem vulnerabilidade de média a alta, uma eventual contaminação constituirá grande risco a toda a área de estudo e impacto extenso às reservas de água subterrâneas (Costa, 2003). Embora não se disponha de análises químicas na área, o odor liberado pelos hidrocarbonetos e inconfundível, e diversas queixas já foram realizadas por moradores que tiveram a qualidade das águas de seus poços modificadas em função de possíveis vazamentos (Cavalcante, 1998). A Figura 1 mostra a localização da Região Metropolitana de Fortaleza – CE.

Pelo exposto, admite-se que existe um risco potencial de contaminação na região do Porto do Mucuripe e esta situação necessita de estudos específicos a fim de caracterizar a situação hidroambiental existente. O estudo de caso inicia com a contextualização da área, seguido da determinação dos parâmetros e aplicação do modelo numérico analítico, finalizando com a apresentação e discussão dos resultados. Toda a fundamentação teórica e metodologia, aplicada ao estudo de caso, foram detalhadas nos capítulos anteriores.

3. Contextualização da área em estudo

A área em estudo está localizada na costa centro-oeste do município de Fortaleza, situada na porção nordeste do estado do Ceará. Abrange uma área de 200.000 m² (0,2 km²), limitada ao norte, leste e oeste pelas linhas da costa, compreendida entre as coordenadas UTM (558400, 9590000) e (559200, 9590000) ao norte, (558200, 9589000) e (559400, 9589000) ao sul. Os limites e coordenadas e localização da área estão definidos na Figura 1.

3.1. Geomorfologia

Com base na homogeneidade das formas de relevo, posicionamento altimétrico, tipos litológicos, atividades tectônicas, solo e vegetação. O relevo da RMF possui quatro domínios geomorfológicos: Planície Litorânea, Tabuleiros Pré-litorâneos, Depressão sertaneja e Maciços Residuais. A região do Mucuripe encontra-se na Planície Litorânea, que inclui as praias, as planícies fluvio-marinhas e os campos de dunas/paleodunas.

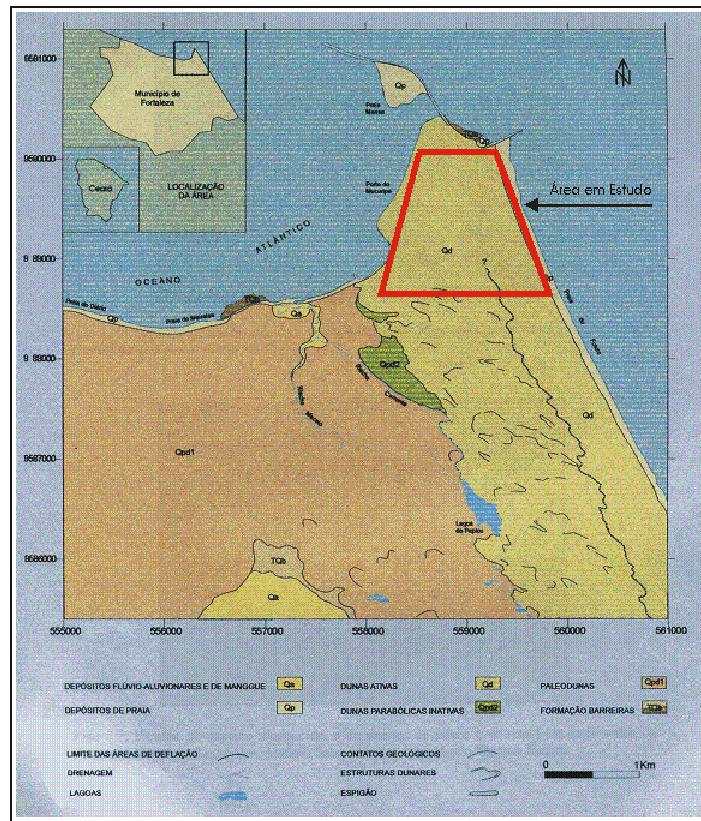


Figura 1 – Localização da Região Metropolitana de Fortaleza – CE e mapa geológico da Região do Porto do Mucuripe, limites, coordenadas e localização da área em estudo

3.2 Sistemas Hidrogeológicos

Na RMF existem quatro sistemas aquíferos, representados pelas dunas/paleodunas, barreiras, aluviões e rochas do embasamento pré-cambriano. A região do Porto de Fortaleza encontra-se sobre o sistema aquífero dunas/paleodunas (Figura 1). As dunas/paleodunas ocupam uma área de 184,7 km², acompanhando a orla costeira da RMF, com largura média de 2,5 km, adentrando um pouco mais ao continente nos setores. Formam campos morfologicamente homogêneos, recortados ocasionalmente pela rede de drenagem e possibilitando a existência de lagoas interdunares. Neste trabalho foi ressaltada a necessidade de preservação destas áreas, em função da importância que estas representam para o abastecimento d'água e a conservação hidroambiental. As dunas/paleodunas são compostas por areia pouco consolidadas e extremamente homogêneas, finas a média, com diâmetro efetivo predominado entre 0,15 a 0,25 mm e espessura entre 10 a 25 metros. As dunas/paleodunas representam o sistema de maior potencialidade aquífera da RMF, sendo classificadas como um aquífero livre com espessura variando de 10 a 25 metros e nível estático geralmente inferior a 20 m. Os valores de condutividade hidráulica oscilam entre 0,73 e $2,5 \times 10^{-4}$ m/s e a espessura saturada é de aproximadamente 8 metros e as vazões médias registradas são de 6 m³/h (Cavalcante et al, 2000). O mapa potenciométrico, ou piezométrico, da área apresenta potencial hidráulico de -15,0 a 5,0 m. O fluxo hídrico é apresentado pelos vetores de fluxo que indicam sua direção e sentido (Figura 2).

A faixa costeira, compreendida entre as cotas de -5,0 e 5,0 m, é a região onde se encontram importantes áreas de recarga, associados aos campos de dunas móveis e aos depósitos de praia. Os vetores de fluxo hídrico apontam no sentido do continente para o litoral. Cotas mais baixas, entre -15,0 a -35,0 m, estão localizadas no extremo sudoeste da área, associados aos depósitos de paleodunas, fora da área em estudo. Esta parte da área está praticamente delimitada por uma superfície topográfica relativamente elevada, relacionada aos baixos valores de nível potenciométrico. As cotas superiores a 5,0 m representam uma pequena parcela dos domínios aquíferos sedimentares da área, estão relacionados aos campos de dunas ativas e depósitos aluvionares, provavelmente em razão de sua elevada condutividade hidráulica e das grandes superfícies disponíveis para recarga hidráulica.

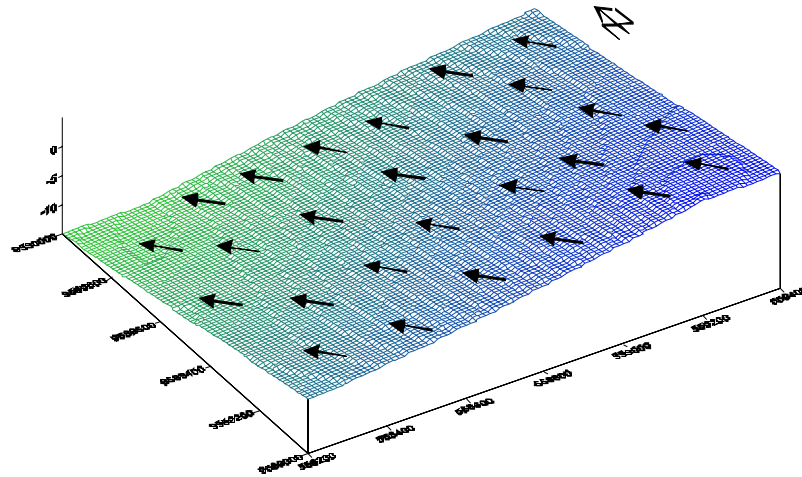


Figura 2 – Mapa de tendências da superfície piezométrica e direção do fluxo da água subterrânea.

3. Modelagem Numérico-Analítica

A forma bidimensional da equação de fluxo transiente de água subterrânea para meio poroso saturado é definida por:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

onde S_s é o coeficiente de armazenamento específico [L^{-1}], K_x e K_y são os valores de condutividade hidráulica na direção x e y , respectivamente, e t é o tempo [T].

Para o caso de um contaminante que sofre retardamento, como o caso dos compostos orgânicos derivados de petróleo, temos:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

onde R é o fator de retardamento, adimensional, onde, C é a concentração do contaminante [M/L^3] em função do tempo, o que caracteriza o problema de natureza transiente; D_x é o coeficiente de dispersão longitudinal [L^2/T]; v_x é a velocidade da água subterrânea [L/T]; x é a variável espacial [L] e t o tempo [T]; θ é a umidade volumétrica ou teor de água [L^3/L^3], para o caso de saturação ($\theta = n$); ρ é a densidade do meio poroso (aquífero) [M/L^3]; K_d é a constante da isoterma de Freundlich ou coeficiente de distribuição [L^3/M]; λ é o coeficiente de decaimento de primeira ordem do contaminante [T^{-1}]. Em nenhum dos casos estudados nesse trabalho foi considerado o efeito do decaimento do contaminante.

Uma vez conhecida às equações diferenciais (1 e 2) que rege o problema, a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) consiste inicialmente na discretizado do domínio (ou geometria) em uma malha de elementos finitos. Quando se aplica o MEF, se obtém um sistema de equações diferenciais ordinárias, com solução para valores de C e dC/dt a cada nó na malha de elementos finitos, a cada tempo, dada por:

$$[S^*] \frac{d\{C(t)\}}{dt} + [D^*] \{C(t)\} = \{f^*(t)\} \quad (3)$$

onde, $[S^*]$ é a chamada matriz de sorção global; $[D^*]$ é a chamada matriz de dispersão global; $\{C(t)\}$ é o vetor que contém o valor da concentração do contaminante nos nós da malha e $\{f^*(t)\}$ é conhecido como o vetor de carga nodal, o qual contém as condições de contorno referentes à derivada da variável dependente (contaminante) nos nós da malha, as quais podem também ser função do tempo. As matrizes de dispersão e sorção globais são obtidas a partir das matrizes dos elementos levando em consideração a conectividade dos nós.

A partir deste ponto, quando se utiliza a formulação numérica tradicional, o passo seguinte seria utilizar o Método das Diferenças Finitas em relação ao tempo. Neste caso é preciso discretizar também a variável tempo, escolher entre os diversos esquemas de solução passo a passo e finalmente determinar o valor da variável C (concentração) a cada intervalo de tempo. Na verdade, quando se faz a discretização do tempo adotando um esquema de Diferenças

Finitas, a solução está sendo “linearizada”, quando a solução real, em alguns casos, pode ser fortemente não-linear, fato que pode levar a erros consideráveis. Visando eliminar a adoção da discretização do tempo, tendo em vista os motivos acima descritos, a partir deste ponto é apresentado o equacionamento de uma metodologia analítica para o tratamento da variável tempo. A equação (3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{d\{C(t)\}}{dt} = -[S]^{-1}[D]\{C(t)\} + [S]^{-1}\{f(t)\} \quad (4)$$

$$\text{onde, } \frac{d\{C(t)\}}{dt} = [A]\{C(t)\} + \{F(t)\} \quad (5)$$

$$[A] = -[S]^{-1}[D] \quad (6)$$

$$\{F(t)\} = [S]^{-1}\{f(t)\} \quad (7)$$

$$\text{A solução de (3) é dada por: } \{C(t)\} = e^{[A]t} \{C\}_{t=0} + e^{[A]t} \int_0^t e^{-[A]s} \{F(s)\} ds \quad (8)$$

O vetor $\{C(t)\}_{t=0}$ contém os valores das concentrações para o tempo inicial, sendo, portanto a condição inicial do problema. Em geral a concentração em um nó é conhecida, e para sistemas que encontram-se inicialmente livre de contaminação as concentrações nos outros são iguais a zero. A matriz exponencial $e^{[A]t}$ é conhecida como matriz de transferência. Esta matriz, de fundamental importância para a metodologia, pode ser determinada explicitamente (Castro 1997). Para o estudo de caso $n = 6$, logo a matriz de transferência é dada por:

$$e^{[A]t} = a_0 [I] + a_1 [A] + a_2 [A]^2 + a_3 [A]^3 + a_4 [A]^4 + a_5 [A]^5 \quad (9)$$

onde os coeficientes a_0 a a_5 podem ser determinados usando-se o fato de que os autovalores de $[A]$ também satisfazem (9), desta maneira o seguinte sistema de equações é formado:

$$\begin{aligned} e^{\lambda_1 t} &= a_0 + a_1 \lambda_1 + L + a_n \lambda_n \\ &\quad M \\ e^{\lambda_n t} &= a_0 + a_1 \lambda_1 + L + a_n \lambda_n \end{aligned} \quad (10)$$

sendo, λ_1 , λ_2 e λ_n são os autovalores da matriz $[A]$. Substituindo os autovalores em (10) e resolvendo o sistema para os valores de a_0 , a_1 , e a_n , temos um sistema de equações exponenciais em função de t . Fazendo uso da equação (9) determina-se explicitamente a matriz de transferência. O vetor $\{F(t)\}$ é calculado a partir da equação (7). O cálculo

$\int_0^t e^{-[A]s} \{F(s)\} ds$ é obtido substituindo na matriz de transferência os valores de t por $(-s)$, com s variando de 0 a t . Neste ponto, a solução $\{C(t)\}$, transiente e permanente, está completamente determinada através da equação (8) e o modelo numérico-analítico está demonstrado. O modelo numérico-analítico bidimensional para fluxo hídrico subterrâneo e transporte de contaminantes foi aplicado a região do Porto do Mucuri. Os parâmetros utilizados na modelagem que caracterizam o sistema aquífero dunas/paleodunas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros físicos e hidráulicos do sistema dunas/paleodunas.

Parâmetros	Valores
Velocidade da água subterrânea (m/d)	0,02
Coeficiente de dispersão longitudinal – D_x (m ² /d)	0,675
Coeficiente de dispersão transversal – D_y (m ² /d)	0,0675
Porosidade – n (%)	0,30
Condutividade hidráulica (m/d)	14
Espessura saturada (m)	10
Domínio físico (m)	1200 x 1000

Da mesma forma que para o caso teórico, nesse estudo de caso foi analisado o comportamento do fluxo hídrico subterrâneo e da pluma de contaminação para os compostos BTEX. Considerou-se na modelagem as propriedades

hidráulicas do aquífero e as propriedades físicas e químicas dos compostos orgânicos que influenciam no seu movimento no meio subterrâneo. O aquífero é considerado livre, homogêneo e isotrópico, a porosidade e a condutividade hidráulica são constantes no tempo e o fluxo é permanente (carga hidráulica constante). O sistema é considerado isotérmico a temperatura de 20 °C. A Figura 3 mostra a discretização do domínio e as condições de contorno aplicadas na modelagem do fluxo hídrico subterrâneo, a localização da contaminação e dos poços. Para o caso de fluxo hídrico subterrâneo o domínio, foi discretizado em uma malha de elementos finitos de 25 elementos e 21 nós.

Foi considerado um taxa de bombeamento de 6,0 m³/d em 3 poços localizados nos nós 11, 12 e 14. A taxa de bombeamento é a taxa existente nos poços da área e a localização dos poços corresponde à área residencial. As condições de contorno para o caso de fluxo hídrico, são condições de contorno de carga hidráulica. A concentração inicial que atinge o aquífero é de 1500 mg/l e está posicionada no nó 4, localização da unidade de refino da Petrobras, UD-LUBNOR. Foi considerada a mesma concentração para todos os compostos BTEX. O sistema encontra-se inicialmente livre de contaminação, as condições de contorno a montante e a jusante da contaminação são iguais a zero e as condições de contorno no topo e na base do aquífero são do Tipo 2 ou de Newman. A Figura 4 mostra a modelagem do fluxo hídrico aplicando o modelo numérico-analítico quando o sistema atinge o estado permanente. Os rebaixamentos nos nós onde estão localizados os poços são de -11,10 m no nó 11, de -9,78 m no nó 12 e de 8,90 m no nó 14. A velocidade da água subterrânea imposta na simulação foi de 0.02 m/d, no entanto os vetores de fluxo, que representam o módulo da velocidade da água subterrânea no sistema (Figura 4) mostra uma faixa de variação da velocidade de 0.002 m/d a 0,042 m/d, essa variação é ocasionada taxa de bombeamento a qual o sistema foi submetido.

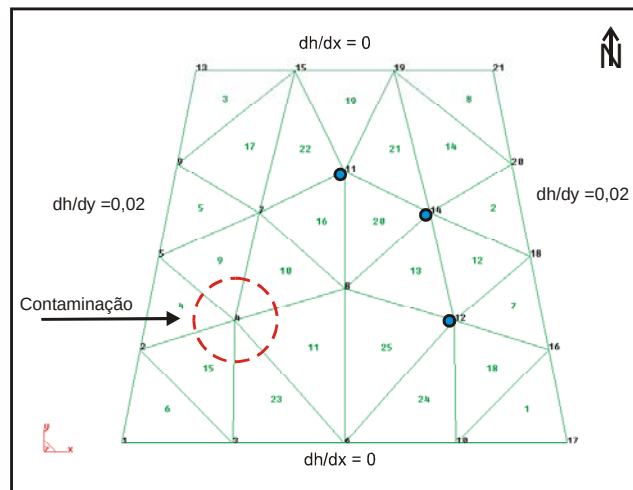


Figura 3 – Discretização do domínio, condições de contorno aplicadas na modelagem do fluxo hídrico subterrâneo, localização da contaminação e dos poços.

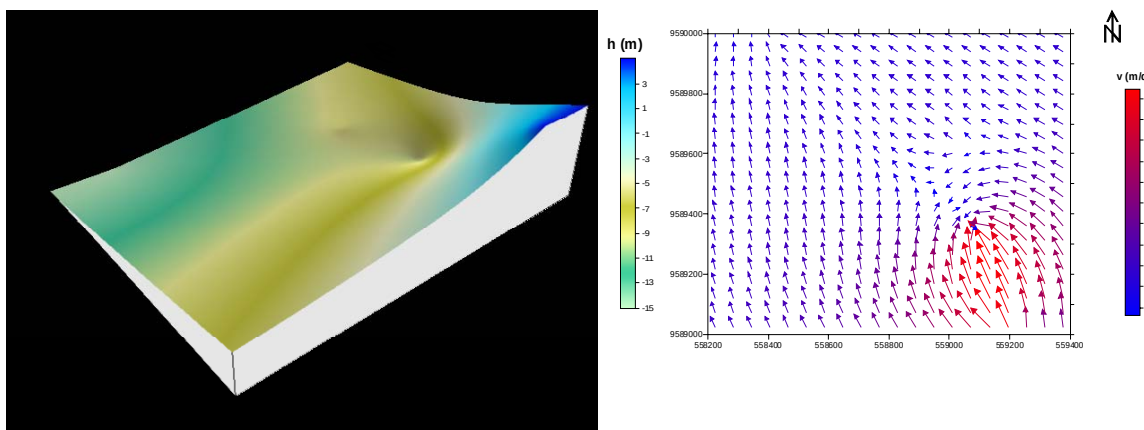


Figura 4– Comportamento do nível potenciométrico para o estado permanente e vetores de fluxo

Os resultados apresentados mostram que o MNA fornece resultados confiáveis, pelo fato dos mesmos representarem fielmente a física do problema. Desta forma, pode-se dizer que o MNA é uma ferramenta para modelagem fluxo hídrico subterrâneo, fácil de ser manipulada e que produz bons resultados. As Figuras 5, 6, 7 e 8 mostram as plumas de contaminação para os compostos Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno, respectivamente.

Uma observação importante pode ser feita tomando como referencia as plumas de contaminantes dos compostos BTEX no caso de contaminação da água subterrânea na Região do Porto do Mucuri. Começando pela forma que as plumas de contaminação se apresentam, podemos verificar claramente a influencia da direção do fluxo

hídrico subterrâneo na propagação da pluma. Como a direção do fluxo não está na mesma direção do gradiente hidráulico, considerado no modelo, como pode ser verificado através dos vetores de fluxo, acarreta em uma desconformidade nas curvas de isoconcentração. Santos (1998) mostra que uma perturbação no movimento da pluma de contaminação pode ocorrer, podendo a mesma se romper ou ser diluída quando em contato com correntes de fluxo de água. Outra consideração está nos valores de concentração que diferem do estudo de caso que apresentou valores menores do que as concentrações encontradas no modelo teórico. Essa diferença é devido primeiramente ao fato que foi citado anteriormente, a direção do fluxo hídrico, e também ao comprimento longitudinal que é 5 vezes maior do que o domínio do modelo teórico.

Os resultados apresentados mostram a aplicabilidade do MNA na previsão de cenários de contaminação das águas subterrâneas fornecendo valores confiáveis quando se está de posse de dados de campo que configurem com fidelidade os casos reais. Sua aplicação pode ser estendida a problemas mais complexos, necessitando apenas de uma boa caracterização do sistema. Com este estudo de caso cumpriu-se um dos objetivos específicos, que consta da validação e aplicabilidade no modelo numérico-analítico a um caso real.

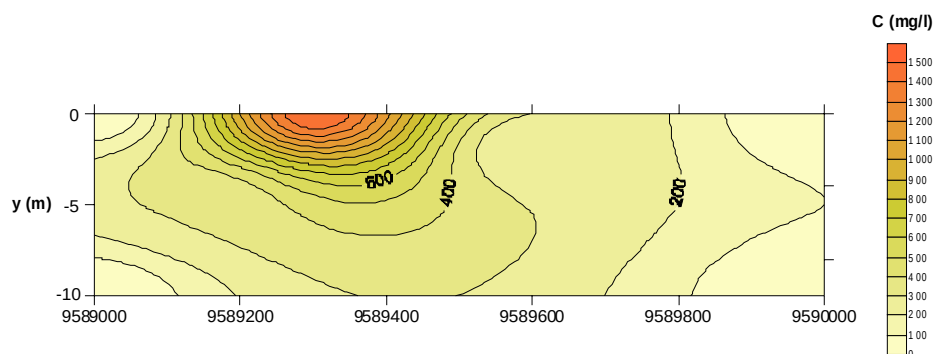


Figura 5 - Pluma de Benzeno

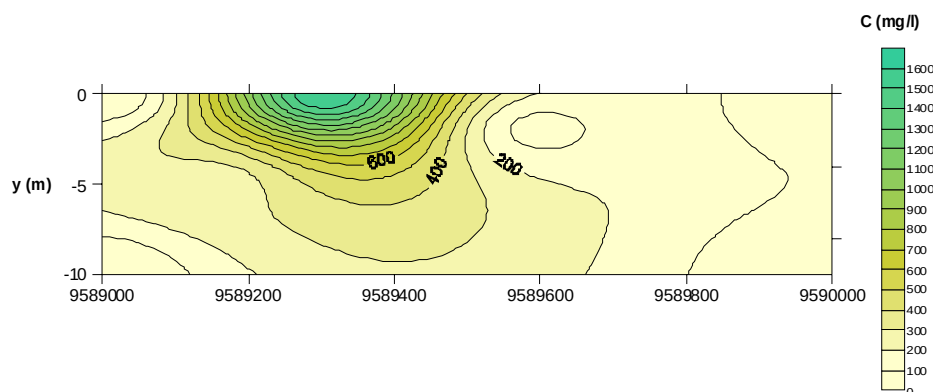


Figura 6 - Pluma de Tolueno

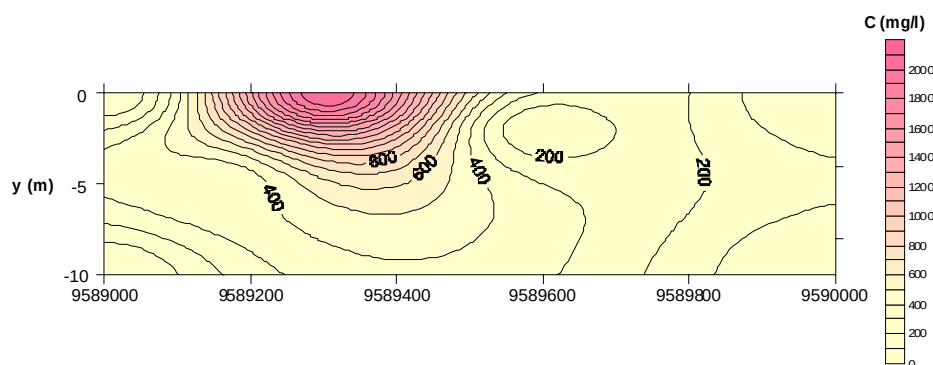


Figura 7 - Pluma de Etilbenzeno

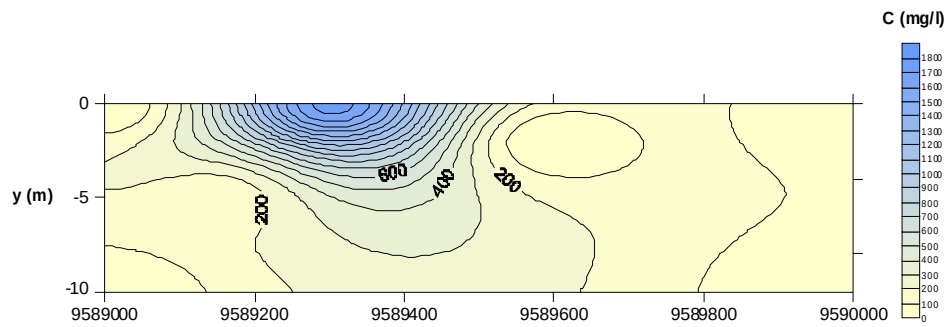


Figura 8 - Pluma de Xileno

4. Conclusões

Concluindo, pode-se dizer que uma contaminação da área da região do Porto do Mucuri, por compostos BTEX, acarreta comprometimento da qualidade das águas subterrâneas em níveis bastante elevados. Mesmo sem existir uma legislação que aponte para os valores mínimos de concentração desses compostos nas águas subterrâneas, tomando como base os valores de referência de qualidade divulgados pela CETESB, relatório de qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo, aponta para valores de referência de qualidade 2,5 µg/l para o benzeno, tolueno e xileno e valores de intervenção de 5 µg/l para o benzeno, 170 µg/l para o tolueno e 300 µg/l para o xileno. Não foram citados nesse relatório valores de referência para o etilbenzeno.

O modelo apresentado é um procedimento alternativo ao uso dos métodos numéricos tradicionais para solução de problemas transientes encontrados na prática na área de recursos hídricos, em especial na água subterrânea. A vantagem dessa metodologia é que, por ser analítica no que se refere à variável tempo, evita problemas de instabilidade numérica e acumulação de erro de arredondamento computacional, os quais podem ser significantes quando o método das diferenças finitas é usado para discretização do tempo. O modelo numérico-analítico, é uma nova metodologia para análise do fluxo hídrico subterrâneo e transporte de contaminantes, e associa a versatilidade dos métodos numéricos tradicionais de acomodar condições de contorno com geometrias de domínios complexos e meios heterogêneos com a garantia de convergência e estabilidade das soluções normalmente encontradas nos métodos analíticos, podendo-se concluir, que o mesmo é uma importante alternativa para a modelagem matemática de fluxo e transporte de contaminantes.

5. Referências

- COSTA, C.T.; PUERARI, E.M.; CASTRO, M.A.H. 2003. Análise de vulnerabilidade natural da contaminação de águas subterrâneas no porto de Fortaleza/CE. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba-PR.
- CAVALCANTE, I.N. 1998. Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada de recursos hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará. Tese de Doutorado – Instituto de Geociência. Universidade de São Paulo. SP.
- CASTRO, M. A. H. (1997). Uma Metodologia Numérico-Analítica para Solução de Problemas Transientes em Recursos Hídricos, XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, ES, Vol. 2, p. 313-318.
- SANTOS, H.P.S. 1998. Simulação composicional para transporte de hidrocarbonetos em aquíferos. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas- SP
- CETESB, São Paulo. Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2001 - 2003 - São Paulo: CETESB, 2002.