

AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS A PARTIR DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO À BASE DE N-PARAFINA

Stela Santos Cota¹; Everton de Oliveira^{2,4}; Ricardo L. C. Vaqueiro³ & Flávio Augusto Ferlini Salles⁴

Resumo – Durante a perfuração de poços para extração de petróleo são utilizados fluidos de perfuração compostos por diversos produtos químicos com finalidades específicas em função das características de cada poço. Entre os compostos de interesse ambiental presentes neste tipo de fluido, destaca-se a n-parafina e cloretos, algumas vezes com traços de BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos). Como durante a perfuração podem ser atravessados aquíferos potáveis, resta a preocupação de que o contato desses fluidos com estes aquíferos possa gerar problemas de contaminação ambiental. Este trabalho apresenta um caso de estudo de um poço que atravessou toda a espessura do aquífero São Sebastião, Bahia, onde se simulou matematicamente o transporte dos compostos encontrados em uma amostra recolhida por RFT (repeat formation test) durante a perfuração. A partir da simulação destes valores reais, pode-se concluir que, a menos de 1 metro do poço, as concentrações encontram-se perfeitamente dentro de padrões de potabilidade para todos os compostos analisados. De acordo com a metodologia utilizada, a utilização do fluido n-parafina é ambientalmente inofensivo como fluido de perfuração a ser utilizado neste tipo de cenário geológico.

Abstract – The use of drilling fluids and muds is standard practice in oil industry. The composition of these fluids is designed according to the formation and the well properties. Some of the compounds that are common to most fluid formulas are considered environmental contaminants, among them n-paraffin and chloride, sometimes with trace BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes). Before reaching the depth to the oil reservoir, the drilling of the well might cross aquifers that are used for drinking purposes and the contact of the water with the drill fluid might pose some concern about the aquifer contamination. This paper presents a case study where a well fully penetrated São Sebastião Aquifer, in Bahia, Brazil and a mathematical model³ was applied to simulate the fate and transport of the solute compounds found in a RFT (repeat formation test)

¹ Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN; C.P. 941, Belo Horizonte, MG, 30.123-970, +55-31-3499-3351, sdsc@cdtn.br

² IGc-USP - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, everton@hidroplan.com.br

³ Petrobras - Petróleo Brasileiro S.A. , Salvador, BA, +71-350-3189, vaqueiro@ep-ba.petrobras.com.br

⁴ Hidroplan - Hidrogeologia e Planejamento Ambiental S/C Ltda, +11-4612-0480, flavio@hidroplan.com.br

sample collected during the drilling period. The results indicated that within 1,0 m from the well all concentration values of the detected compounds were well below water drinking standards. According to this conclusion, the use of the n-parafin fluid might be considered harmless to the environment and is recommended in similar geological scenarios.

Palavras-chave – Aquífero; Contaminação; Petróleo.

INTRODUÇÃO

Durante a perfuração de poços para petróleo, são utilizados fluidos com vários objetivos, entre os quais o carreamento dos fragmentos de rocha perfurada até a superfície, a sustentação desses detritos nas paradas de circulação, a lubrificação e resfriamento da broca, a sustentação das paredes do poço e a contenção dos fluidos no reservatório (óleo, gás ou água). Ao término da perfuração, os poços são revestidos e o fluido remanescente é encaminhado para reutilização.

Neste processo, podem ser atravessados aquíferos passíves de serem contaminados pelos fluidos utilizados durante os trabalhos. A preocupação ambiental com fluidos filtrados para a formação leva a considerar a influência desses fluidos nos aquíferos atravessados.

O fluido de perfuração é basicamente uma suspensão coloidal cujo componente principal é a argila, conhecida comercialmente como bentonita. Na formulação do fluido de perfuração entram diversos produtos químicos, tais como água industrial, sais solúveis, amidos, alcalinizantes, viscosificantes e polímeros, que possuem finalidades específicas em função das características de cada poço. Dentre as diversas composições de fluido existentes, destacam-se os fluidos a base de n-parafina devido à grande estabilidade do poço resultante pelo seu uso durante a perfuração.

Dentre os compostos de interesse ambiental presentes neste tipo de fluido, destacam-se a n-parafina e o cloreto. A n-parafina é um composto contendo hidrocarbonetos na faixa predominante C13 a C18, mas que podem apresentar alguns compostos que merecem atenção especial, como o grupo BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) e alguns poliaromáticos (como o benzo(a)pireno), por exemplo.

O cloreto de sódio (sal) presente apresenta-se neste estágio em concentrações muito elevadas, próximos da saturação (cerca de 260.000 mg/L) e é caracterizado pela sua grande mobilidade no aquífero, podendo sofrer dispersão mecânica durante o transporte. A velocidade de transporte, no entanto, aproxima-se da velocidade de fluxo da água subterrânea. No caso deste composto, o limite de potabilidade em água é atingido, de acordo com a Portaria 1469 do Ministério da Saúde, em concentrações de 250 mg/L, ou seja, cerca de 1.000 vezes abaixo da concentração inicial no cenário avaliado.

A presença de receptores que eventualmente consumam água que possa ser impactada, a localização do poço a ser perfurado, parâmetros hidrogeológicos do aquífero, a composição da lama utilizada, entre outros fatores, contribuem para diversificar os cenários em cada evento de perfuração.

Neste trabalho, avaliou-se uma situação real onde uma perfuração de poço atravessou toda a espessura do aquífero São Sebastião, o mais importante do Estado da Bahia. Durante a perfuração, foi recolhida uma amostra por RFT (Repeat Formation Test) [1] do fluido percolado (filtrado). A amostra foi analisada para VOC (compostos orgânicos voláteis), SemiVOCs (compostos orgânicos semivoláteis), condutividade e cloretos. A partir destes valores reais, realizou-se uma simulação matemática do transporte de solutos originados pela perfuração e interpretou-se suas conseqüências ambientais.

RESULTADOS

Caracterização do aquífero

O aquífero São Sebastião está presente em grande parte do território baiano, apresentando potabilidade em suas porções mais rasas, com a concentração de sais aumentando de acordo com aumento de profundidade. O aquífero apresenta transmissividade de $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, condutividade hidráulica média de $2,7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e coeficiente de armazenamento $4,0 \times 10^{-4}$ [2] A porosidade total, medida a partir de medidas geolétricas, é de 26% [3]. O gradiente hidráulico médio (5%) foi obtido a partir do "Levantamento hidrogeológico básico da Bacia de Tucano, Vale do Itapicuru - Minter - Governo do Estado da Bahia, Convênio DNOCS/CERB [4].

Amostragem de água utilizando RFT (Repeat Formation Test)

O RFT Repeat Formation Test é um teste de formação a cabo que pode ser utilizado diversas vezes durante uma única descida no poço [1]. Perfis de raio gama ou potencial espontâneo são utilizados como controle de profundidade. A cada profundidade avaliada, um pré-teste é realizado onde várias pequenas amostras são coletadas da formação. Durante este pré-teste a pressão do fluido na formação próximo ao furo é monitorada até que seja atingido o equilíbrio. Os valores de pressão são armazenados em superfície tanto em modo analógico quanto em escala digital de alta resolução.

As amostras de fluido do pré-teste não são preservadas. Entretanto, após o sucesso do pré-teste em uma zona de interesse, uma amostra de maior volume de fluido é coletada e preservada. Numa mesma descida, uma amostra de fluido segregada pode ser obtida de uma única profundidade ou duas amostras podem ser colhidas de profundidades distintas.

Os resultados do RFT no poço MGP-37D-BA indicaram uma pressão estática no ponto amostrado de 41,18 Kgf/cm², permeabilidade de 89,3 mD, correspondendo a uma condutividade hidráulica de $8,6 \times 10^{-7}$ m/s ou 0,07 m/dia. A porosidade total foi de 30%.

O aquífero São Sebastião foi interceptado a partir da profundidade de 99 m até a profundidade máxima de 617 m, sendo que o fluido com n-parafina foi utilizado a partir da segunda fase de perfuração (400-1450 m) e a amostragem com o RFT foi realizada na profundidade de 473 m. O volume total de água amostrado foi de 0,2 m³. Os valores determinados pelo método correspondem àqueles encontrados na literatura.

Caracterização do filtrado e do fluido de perfuração

Foram coletadas amostras do fluido fresco e do fluido filtrado (RFT) para avaliação das concentrações de compostos voláteis (VOC), semi-voláteis (SVOC) e de cloretos. Os resultados das análises químicas para o filtrado (utilizada na simulação) estão apresentados na Tabela 1.

Dentre os valores encontrados, salienta-se a concentração de cloretos no filtrado (3.300 ppm), que pode ser utilizada como referência na evolução da pluma de solutos gerada pela perfuração, uma vez que este composto é conservativo, isto é, ele não é adsorvido pelos minerais formadores do meio poroso e também não sofre qualquer tipo de decaimento físico ou químico durante seu transporte pela água subterrânea.

Tabela 1. Resultados das análises químicas do fluido filtrado

Composto	µg/L	Composto	µg/L
Acenafteno	ND	Etilbenzeno	1,01
Acenaftileno	ND	Xilenos	5,81
Antraceno	ND	Tetracloroetano	ND
Benzo(a)antraceno	ND	Tricloroetano	ND
Benzo(a)pireno	ND	Clorofórmio	ND
Fenantreno	ND	1,2-Dicloroetano	ND
Fluoranteno	ND	1,1,1-Tricloroetano	ND
Fluoreno	ND	1,1,2-Tricloroetano	ND
Naftaleno	ND	1,1-Dicloroetano	ND
Pireno	ND	Tetracloroeto de carbono	ND
Diclorometano	9,06	1,4-Diclorobenzeno	ND
1,2-Dicloroetano (cis+trans)	ND	1,2-Diclorobenzeno	ND
Benzeno	2,89	Estireno	ND
Tolueno	2,77	1,1,2,2-Tetracloroetano	ND
Clorobenzeno	ND	Cloretos	3.300.000

ND - não detectado

Desenvolvimento e implementação do modelo matemático

O transporte de solutos dissolvidos em uma fase aquosa é governado através de fenômenos de advecção e dispersão hidrodinâmica, entre outros. A equação diferencial abaixo (Eq. 1) descreve esses fenômenos e fornece a concentração do soluto na fase aquosa em função do espaço (tridimensional) e do tempo.

$$\frac{\partial C(x,y,z,t)}{\partial t} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C(x,y,z,t)}{\partial x^2} + D_y \cdot \frac{\partial^2 C(x,y,z,t)}{\partial y^2} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C(x,y,z,t)}{\partial z^2} - v_x \cdot \frac{\partial C(x,y,z,t)}{\partial x} \quad (1)$$

Nesta equação, C é a concentração do soluto na fase aquosa, D_x , D_y e D_z são os coeficientes de dispersão hidrodinâmica nas direções x , y e z , respectivamente, v_x é a velocidade linear da água subterrânea e t é o tempo. Esta equação inclui as seguintes considerações:

1. O soluto é conservativo, não se biodegradando nem sofrendo reações químicas, e não se adsorvendo na matéria orgânica do solo.
2. O aquífero é homogêneo e isotrópico.
3. O fluxo da água subterrânea é uniforme e constante na direção x , ou seja, o espalhamento do soluto por advecção ocorre apenas na direção x .
4. Os coeficientes de dispersão hidrodinâmica são constantes no tempo e no espaço.

A Eq. 1 apresenta solução analítica para alguns casos de condição de contorno, sendo que a condição inicial é sempre tomada como concentração zero em todo o domínio (infinito). Uma das soluções mais conhecidas (Eq. 2) aplica-se à entrega instantânea de uma determinada massa de soluto por uma fonte pontual, sendo referida como modelo de fonte pontual [5, 6].

$$C(x,y,z,t) = \frac{M_0}{\phi} \cdot f_x(x,t) \cdot f_y(y,t) \cdot f_z(z,t) \quad (2)$$

onde M_0 é a massa de soluto entregue ao aquífero, ϕ é a porosidade total e f_x , f_y e f_z são soluções particulares para as direções x , y e z , respectivamente, sendo descritas pelas Eqs. 3, 4 e 5.

$$f_x(x,t) = \frac{1}{2(\pi \cdot D_x \cdot t)^{1/2}} \cdot \exp\left\{ \frac{-(x - v_x \cdot t)^2}{4 \cdot D_x \cdot t} \right\} \quad (3)$$

$$f_y(y,t) = \frac{1}{2(\pi \cdot D_y \cdot t)^{1/2}} \cdot \exp\left\{ \frac{-(y)^2}{4 \cdot D_y \cdot t} \right\} \quad (4)$$

$$f_z(z,t) = \frac{1}{2(\pi \cdot D_z \cdot t)^{1/2}} \cdot \exp\left\{ \frac{-(z)^2}{4 \cdot D_z \cdot t} \right\} \quad (5)$$

A solução da fonte pontual pode ser estendida a outras geometrias de fonte através do princípio de superposição. No caso em estudo, tem-se uma entrega de soluto em um poço que, aproximadamente, atravessa todo o aquífero. A entrega, neste caso, é realizada em linha (unidimensional em z). Essa linha pode ser aproximada por fontes pontuais em série, sendo

descritas através de comprimentos infinitesimais (dz) da linha. A massa do soluto, que antes era entregue em um ponto, passa a ser descrita como:

$$M_0 = M_1 \cdot dz \quad (6)$$

onde M_1 refere-se à massa entregue por unidade de comprimento da linha.

Alterando a Eq. 2 com a Eq. 6 e realizando a integração ao longo de todo o comprimento da linha (de $-\infty$ a ∞), obtém-se uma solução independente da profundidade z , tornando o problema bidimensional, nas direções x e y , como mostra a Eq. 7.

$$C(x, y, t) = \frac{M_1}{\phi} \cdot f_x(x, t) \cdot f_y(y, t) \quad (7)$$

A Eq. 7 ainda pressupõe uma entrega instantânea de massa M_1 . Para considerar uma fonte contínua de soluto, a solução pode ser modificada aplicando o princípio da superposição para o tempo, através da Eq. 8.

$$C(x, y, t) = \frac{1}{\phi} \int_0^t \frac{dM_1}{dt'} \cdot f_x(x, t - t') \cdot f_y(y, t - t') dt' \quad (8)$$

onde $\frac{dM_1}{dt'}$ refere-se à taxa de massa de soluto entregue por unidade de comprimento do poço. Nota-se que ao se multiplicar M_1 pelo comprimento total do poço, obtém-se a massa total entregue ao aquífero, que corresponderia a M_0 .

O modelo definido pela Eq. 8 foi implementado em Visual Basic do Microsoft Excel 97. A verificação do modelo foi realizada comparando-se os resultados obtidos através do modelo implementado com a solução obtida através do software MathCad 7. Optou-se em desenvolver o modelo em Visual Basic, ao invés de utilizar a solução do software MathCad, devido à sua portabilidade, maior robustez e melhores opções para a saída dos resultados.

Modelagem matemática do problema

No caso em estudo, a taxa de massa de soluto entregue por unidade de comprimento da fonte (M_1) foi descrita considerando que o mecanismo de transferência do soluto do fluido de perfuração para o aquífero se dá através do contato direto entre a água e o fluido de perfuração. Para tanto, estimou-se que, até o raio de 1,16 m em torno do centro do poço, os poros estariam praticamente preenchidos pelo fluido de perfuração. A taxa com que a água subterrânea atinge a área inundada pelo fluido de perfuração foi calculada através da descarga específica (velocidade de Darcy), considerando a área transversal ao fluido no ponto de contato, por unidade de comprimento do poço. Assim, a taxa mássica de soluto foi calculada como

$$\frac{dM_1}{dt'} = C_0 \cdot q_x \cdot D_p \quad (9)$$

onde C_0 é a concentração na área de contato, q_x é a velocidade de Darcy e D_p é o diâmetro do cilindro de meio poroso inundado pelo fluido de perfuração (neste caso, 2,31 m). Para os solutos, o valor de C_0 foi considerado como sendo os valores de concentração obtidos para a água da formação próxima ao poço (por exemplo, 3300 ppm de NaCl e 2,89 µg/L de benzeno).

O aquífero foi modelado utilizando valores médios dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos através de ensaios no local. No caso de parâmetros cujos valores são desconhecidos, foram utilizados valores típicos encontrados da literatura. O tempo de simulação considerado foi o tempo de perfuração da fase (entre 1° e 8° dias). A Tabela 2 relaciona os valores dos parâmetros utilizados na modelagem.

Tabela 2. Valores dos parâmetros utilizados na modelagem do caso em estudo.

Porosidade total	30%
Porosidade efetiva	27%
Condutividade hidráulica	0,07 m/dia
Velocidade de Darcy	0,0035 m/dia
Velocidade linear	0,013 m/dia
Dispersividade longitudinal	1 m
Dispersividade transversal	0,1 m

DISCUSSÕES

Pode-se observar pelos resultados apresentados nas Figuras 1 à 10 que a pluma de soluto tende a ser arrastada na direção preferencial do fluxo, alongando-se nessa direção enquanto permanece mais estreita na direção perpendicular. Analisando os valores obtidos, pode-se verificar que a concentração tende a aumentar com o tempo de perfuração, tornando-se mais pronunciada próximo ao poço mas decaindo rapidamente ao se afastar do poço. Foram representadas nas figuras, apenas as simulações efetuadas para 1° e 8° dias de operação. Convém salientar que as Figuras 1 a 10 não representam superfícies topográficas, mas sim superfícies de concentrações, sendo modeladas de acordo com o decaimento a partir da fonte, localizada na extremidade superior direita em cada modelo.

Para todos os solutos analisados, o avanço das plumas não foi expressivo, mostrando uma tendência a se reduzir a valores desprezíveis a poucos centímetros da fonte. Mesmo no caso mais crítico, do cloreto de sódio, para o qual a concentração da água próximo ao poço foi estimada pelo modelo como sendo superior a 6000 ppm após 8 dias do contato do fluido com a formação, a concentração de NaCl na água se reduz a 1 ppm a menos de 50 cm do poço na direção y . Na direção do fluxo (x), a concentração a 1 metro do poço se reduz a 77 ppm. Para os compostos orgânicos, como a concentração medida na fonte foi muito inferior (da ordem de poucos µg/L), as

concentrações modeladas também foram bastante reduzidas, não significando qualquer problema relativo a potabilidade.

O valor das dispersividades longitudinal e transversal escolhido para o modelo afeta muito o grau de espalhamento que o soluto experimenta, reduzindo também drasticamente a concentração próxima à fonte. Como exemplo, aumentando-se as dispersividades que se vêm utilizando em uma ordem de grandeza, e comparando-se como exemplo do parágrafo anterior (NaCl), verifica-se que a concentração de NaCl próxima à fonte reduz-se para cerca de 1000 ppm. Na direção y , a concentração de 1 ppm será obtida a 1,2 m da fonte, enquanto na direção x , a concentração de ~70 ppm só será obtida a 1,65 m. Entretanto, acredita-se que os valores de dispersividade utilizados nas simulações (1 e 0,1 m, respectivamente) já sejam superestimados considerando-se as pequenas distâncias que a pluma atinge.

Deve-se ressaltar que as limitações intrínsecas do modelo fazem com que as concentrações calculadas sejam superestimadas. O modelo considera que a geometria da fonte é uma linha com dimensões infinitamente pequenas nas direções x e y . Com isso, a massa do soluto entregue, por unidade de comprimento, é aplicada a um ponto de volume infinitesimal, gerando concentrações muito altas a pequenas distâncias da fonte. No entanto, o diâmetro do cilindro que delimita o volume ocupado pelo fluido de perfuração no aquífero não pode ser considerado desprezível para pequenas distâncias, embora o seja em relação às dimensões do aquífero. Com isso, a massa de soluto entregue ao aquífero, que é aplicado a um volume infinitesimal pelo modelo, na verdade é diluído em um volume bem maior. Assim, pode-se esperar que as concentrações próximas ao poço não sejam tão grandes quanto às estimadas.

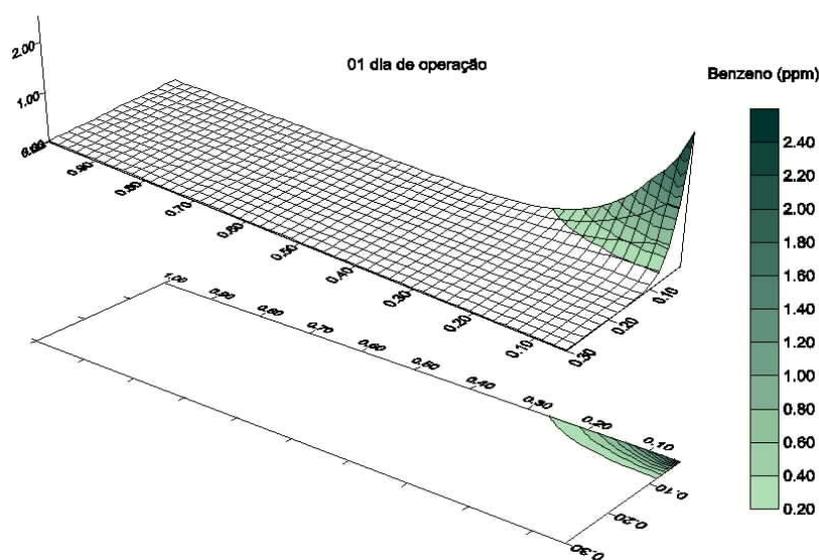


Figura 1. Gráfico de simulação para Benzeno (distância em metros a partir do poço versus concentração em ppb), após 01 dia de operação

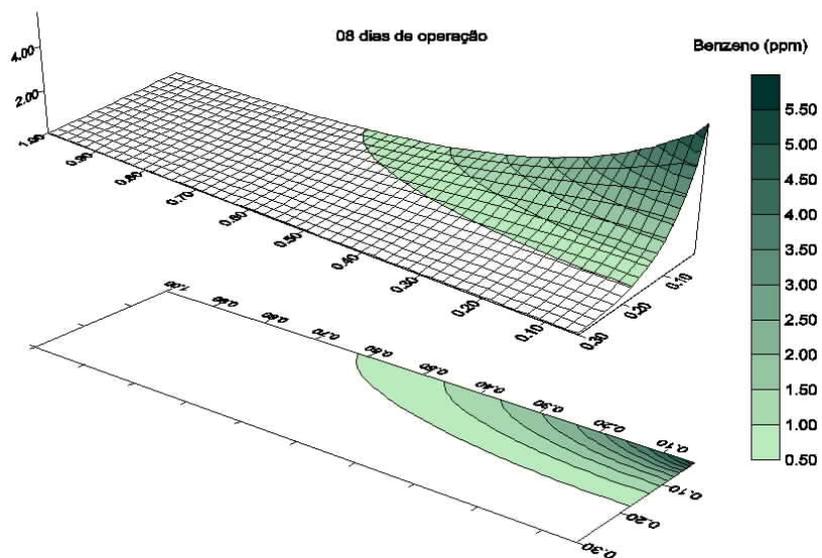


Figura 2. Gráfico de simulação para Benzeno (distância em metros a partir do poço versus concentração em ppb), após 08 dias de operação

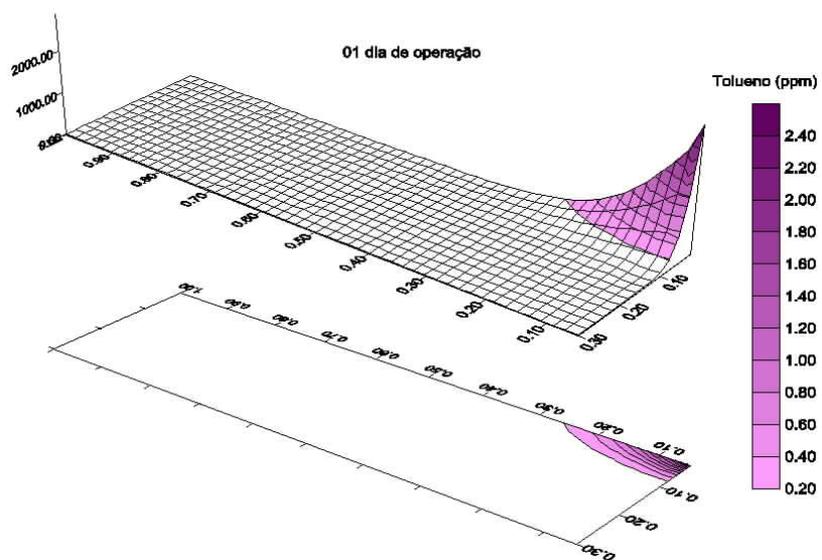


Figura 3. Gráfico de simulação para Tolueno (distância em metros a partir do poço versus concentração em ppb), após 01 dia de operação

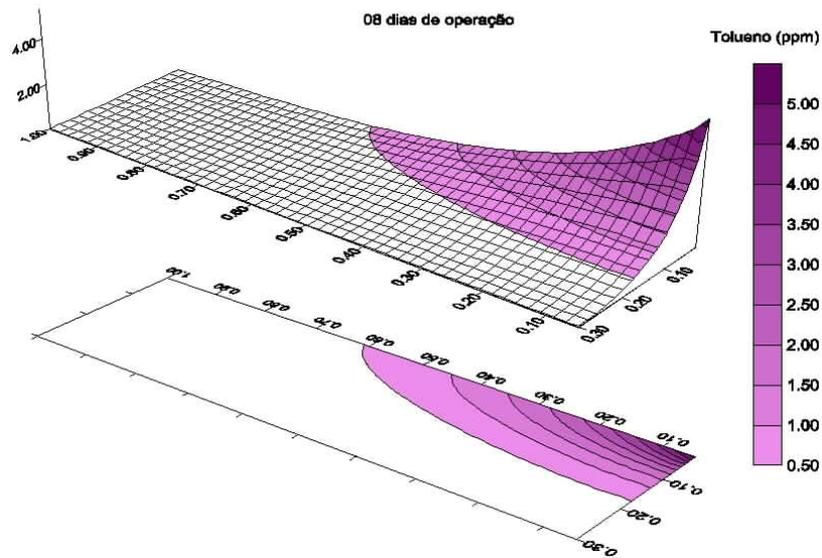


Figura 4. Gráfico de simulação para Tolueno (distância em metros a partir do poço versus concentração em ppb), após 08 dias de operação

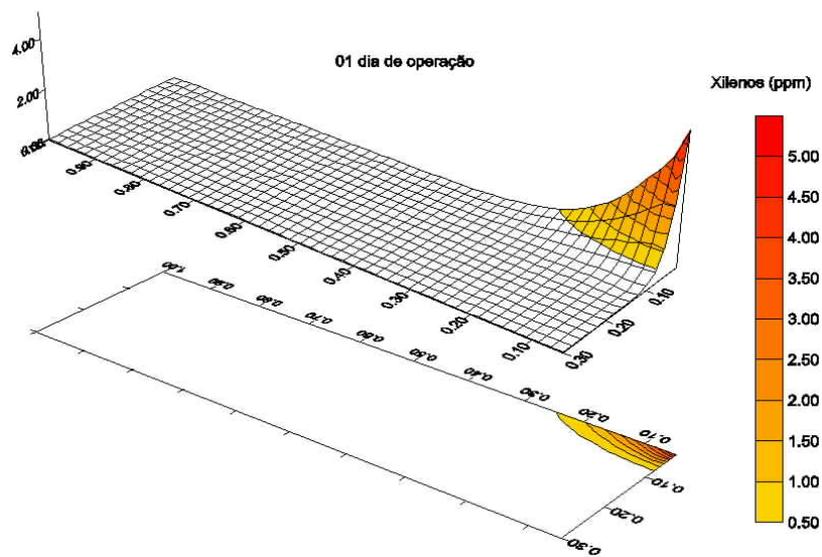


Figura 5. Gráfico de simulação para Xilenos (distância em metros a partir do poço versus concentração em ppb), após 01 dia de operação

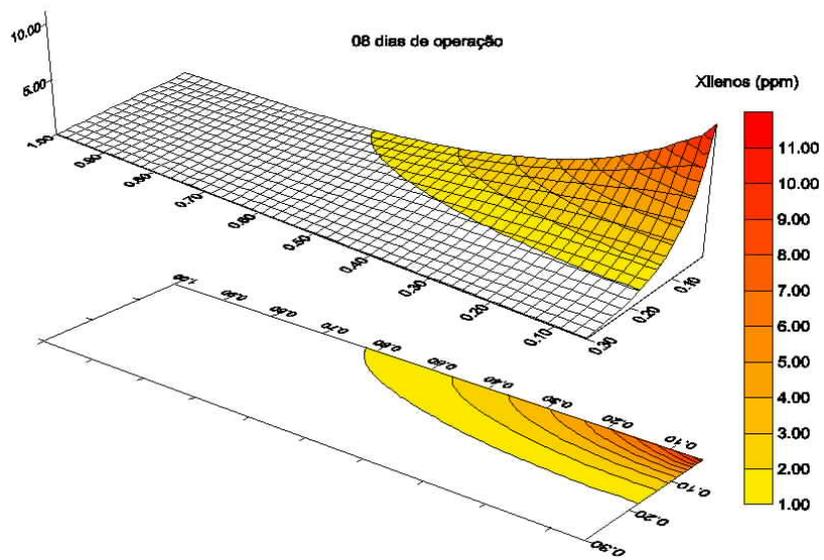


Figura 6. Gráfico de simulação para Xileno (distância em metros a partir do poço versus concentração em ppb), após 08 dias de operação

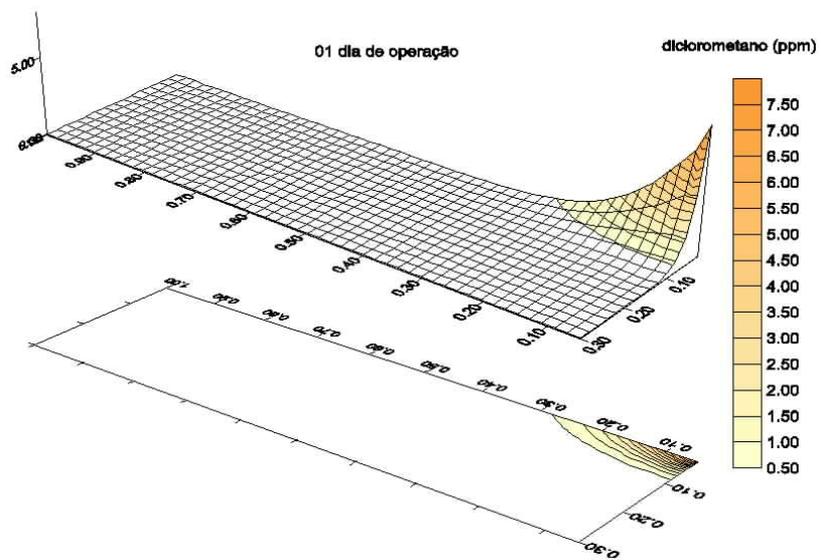


Figura 7. Gráfico de simulação para Diclorometano (distância em metros a partir do poço versus concentração em ppb), após 01 dia de operação

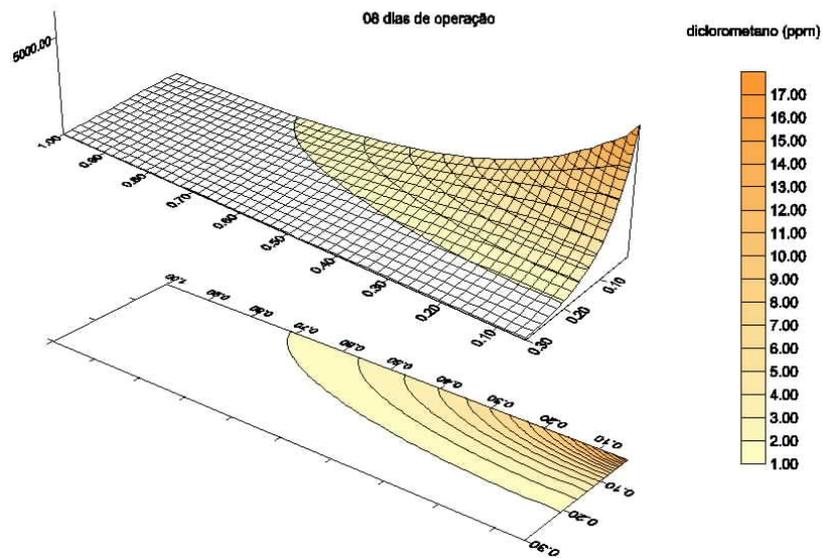


Figura 8. Gráfico de simulação para Diclorometano (distância em metros a partir do poço vs concentração em ppb), após 08 dias de operação

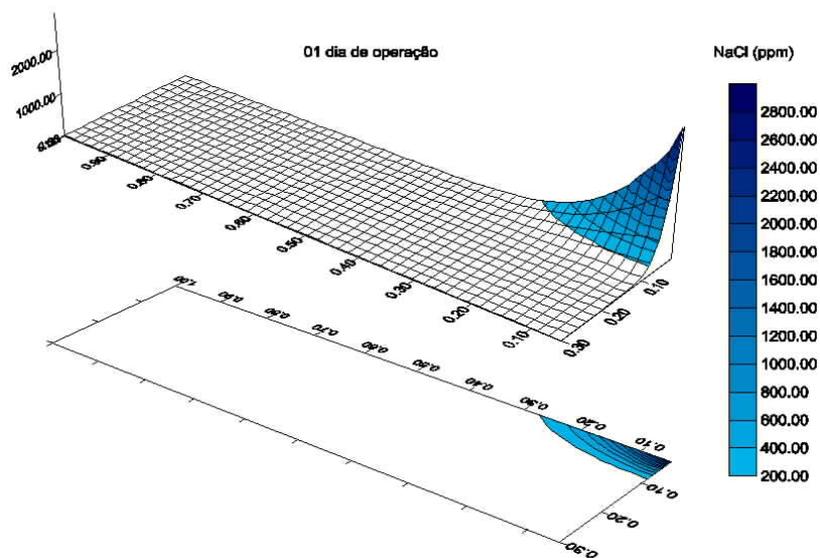


Figura 9. Gráfico de simulação para NaCl (distância em metros a partir do poço versus concentração em ppm), após 01 dia de operação

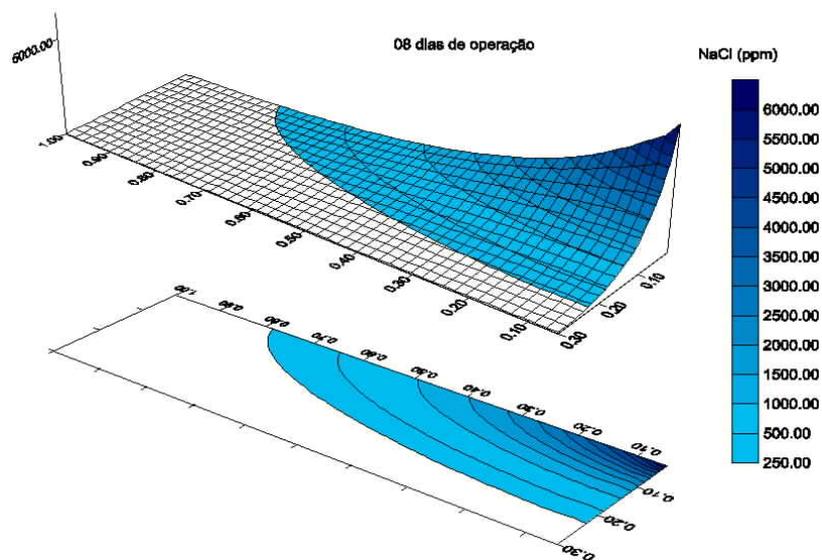


Figura 10. Gráfico de simulação para NaCl (distância em metros a partir do poço versus concentração em ppm), após 08 dias de operação

CONCLUSÕES

Os valores de concentração encontrados no aquífero São Sebastião durante a perfuração do poço estudado, e após a simulação de sua dispersão, permitem concluir que, a menos de 1 metro do poço, as concentrações encontram-se perfeitamente dentro de padrões de potabilidade para todos os compostos analisados. Apesar de ser recomendável a repetição desta mesma avaliação para novas perfurações a fim de se confirmar estatisticamente os dados obtidos, pode-se concluir que, de acordo com a metodologia utilizada, a utilização do fluido n-parafina é ambientalmente inofensivo como fluido de perfuração a ser utilizado neste tipo de cenário geológico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Francisco H. Oswald e Gabriel R. L. de Abreu por seu auxílio e discussões esclarecedoras e à Petrobras, Unidade de Negócios de Exploração e Produção da Bahia, pela cessão dos dados. A co-autora Stela Cota agradece à FAPEMIG o apoio financeiro para a participação neste Congresso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Schlumberger - Material Educacional de Utilização do Repeat Formation Test.
- [2] CUNHA, J.E.M., NEGRAO, F.I. e SANTOS, P.R.P. *Panorama Atual das Águas Subterrâneas no Estado da Bahia*. In Anais do 4o Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas: 80 – 95, 1986
- [3] LIMA, O.A.L. e NIWAS, S. *Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements*. Journal of Hydrogeology 235: 12-26, 2000.
- [4] *Levantamento hidrogeológico básico da Bacia de Tucano, Vale do Itapicuru* - Minter - Governo do Estado da Bahia, Convênio DNOCS/CERB, 1977.
- [5] BAETSLÉ, L.H. *Migration of Radionuclides in Porous Media*. In: A.M.F Duhamel (ed.), *Progress in Nuclear Energy Series XII*, Health Physics, Pergamon Press, Elmsford, NY, p.707-730, 1969.
- [6] DOMENICO, P.A., e F.W. SCHWARTZ. *Physical and Chemical Hydrogeology*, 2^a edição, John Wiley & Sons, 1997.
- [7] PRESS, W.H., S.A. TEUKOLSKY, W.T. VETTERLING, B.P. FLANNERY. *Numerical Recipes in Fortran 77*, Volume 1, 2^a edição, Cambridge University Press, 1992.