

## SIMULAÇÃO DE CURVAS DE RECUPERAÇÃO DE NAPLS POR BOMBEAMENTO. 2. APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO

S. S. Cota<sup>1</sup>, J. Warner<sup>2</sup> e N. L. Caicedo<sup>1</sup>

**Resumo** - Este trabalho apresenta a implementação do algoritmo de simulação da recuperação de NAPLs ao longo do tempo, para sistemas de bombeamento com rebaixamento da superfície freática, desenvolvido no 1º artigo (*Cota et al.*, neste volume). O modelo é aplicado a plantas de recuperação de LNAPLs e DNAPLs e os volumes simulados ao longo do tempo são comparados com os volumes efetivamente recuperados nessas plantas. O modelo simulou bastante bem os casos estudados, o que representa um encorajamento para a continuidade do processo de validação do modelo.

**Palavras-chave** - aquífero contaminado, NAPL, remediação.

### 1. INTRODUÇÃO

Os aquíferos livres contaminados com fluidos imiscíveis (referidos por NAPLs ou óleos) são remediados, em geral, através do bombeamento da fase livre, buscando reduzir o nível de contaminação ao mínimo possível antes que outros métodos de remediação mais refinados sejam aplicados. O 1º artigo (*Cota et al.*, neste volume) apresentou um modelo capaz de prever a curva de recuperação em um sistema de bombeamento com rebaixamento da superfície freática, utilizando poços verticais e horizontais.

Este artigo mostra a aplicação do modelo desenvolvido na simulação de plantas de recuperação de LNAPL e DNAPL, sendo os resultados comparados com os dados de recuperação reais de cada planta. Utilizou-se duas plantas de recuperação: planta de

---

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas / Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500, C.P. 15029, Porto Alegre / RS  
X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas

recuperação de LNAPL, usando 3 poços de bombeamento verticais, e área contaminada por DNAPL sendo remediada por unidades de recuperação compostas por dois poços de bombeamento horizontais.

## 2. APLICAÇÃO DO MODELO E VALIDAÇÃO

### A) PLANTA DE RECUPERAÇÃO DE LNAPL, CONSTANTINE, MICHIGAN<sup>[4]</sup>

A área (A) de 6 acres (0,4 ha), contaminada por produtos a base de petróleo, localiza-se em um aquífero de areia e cascalho, com condutividade saturada (K) de 0,26 m/dia. A pluma de óleo cobria inteiramente a área, com uma espessura inicial ( $H_0$ ) de 61 cm.

A remediação iniciou-se em 1988, usando um sistema de bombeamento com rebaixamento do aquífero composto por 3 poços verticais. Baseado nos detalhes da geometria dos poços, utilizou-se o método Bouwer-Rice (Bouwer, 1989) para estimar a razão entre os raios de influência (R) e os raios dos poços ( $r_w$ ).

A planta de recuperação operou durante aproximadamente 1770 dias, recuperando 447 m<sup>3</sup> do produto derivado de petróleo. A documentação do caso sugere que quase 95% da fase livre inicial foi removida. Portanto, estima-se que o volume inicial do NAPL no aquífero era de 470 m<sup>3</sup>.

Já que não foi possível obter os valores de todos os parâmetros necessários à simulação do programa, a informação sobre o volume inicial da fase livre foi utilizada para estimar os valores que faltavam. A Tabela 1 mostra os valores dos parâmetros utilizados na simulação desse caso, onde  $\rho_{ro}$  é a densidade do óleo relativa à água,  $\mu_{ro}$  é a viscosidade do óleo relativa à água,  $\beta_{ao}$  e  $\beta_{ow}$  são parâmetros de escala das curvas de saturação e pressão capilar para as interfaces ar-óleo e óleo-água,  $\phi$  é a porosidade,  $D_w$  é a espessura saturada do aquífero,  $q_w$  é a taxa de bombeamento de água e  $\lambda$ ,  $h_d$  e  $S_r$  são parâmetros do modelo de Brooks-Corey.

**Tabela 1** – Parâmetros para a planta de recuperação de LNAPL \*

Fluido		Aquífero		RW-01 e 02	
$\rho_{ro}$	0,88 g/cm <sup>3</sup>	$\phi$	0,35	$r_w$	0,457 m

<sup>2</sup> Civil Eng. Dept., Colorado State University, Fort Collins, CO, USA, 80523

\* Os significados dos parâmetros estão referenciados no texto.

$\mu_{ro}$	4 cp	$K$	0,26 m/dia	$R$	3,176 m
$\beta_{ao}$	1,78	$D_w$	8,53 m	$q_w$	545 m <sup>3</sup> /dia
$\beta_{ow}$	3,0	$\lambda$	0,56	<b>RW-03</b>	
$H_o$	0,61 m	$h_d$	0,07 m	$r_w$	0,3045 m
$A$	24 280 m <sup>2</sup>	$S_r$	0,078	$R$	3,193 m
<b>Coordenadas dos poços</b>				$q_w$	272,5 m <sup>3</sup> /dia
<b>Poço</b>	<b>x</b>	<b>y</b>			
<b>RW-01</b>	411	137			
<b>RW-02</b>	335	76			
<b>RW-03</b>	229	183			

O programa simulou um volume recuperado de 435 m<sup>3</sup> após 1770 dias de operação, ou seja, 97% dos 447 m<sup>3</sup> realmente recuperados nesse período. Apesar de não se dispor dos dados de volume recuperados ao longo do tempo para que se possa comparar com os valores calculados pelo programa, a predição do volume recuperado ao fim da operação da planta foi satisfatória.

## B) PLANTA DE RECUPERAÇÃO DE DNAPL, LARAMIE, WYOMING

A remediação da área de 24 ha, contaminada por óleos densos baseados em creosoto, iniciou-se em meados da década passada (Sale e Applegate, 1997), utilizando um sistema de composto por 78 unidades de poços horizontais com indução de gradiente hidráulico. Cada unidade contém dois poços horizontais de 55 m de comprimento para bombeamento de água e de óleo e dois poços horizontais de injeção. A área é constituída por um aluvião com espessura entre 2,4 e 3 m, com uma camada superior de areia e um depósito inferior de cascalho com condutividades de 5 a 10 vezes o valor para a areia. A razão entre as permeabilidades intrínscas das duas camadas ( $k_{op}/k_{wp}$ ) para cada unidade foi utilizada para considerar o efeito da heterogeneidade do solo neste caso.

A Tabela 2 traz os dados utilizados na simulação das 3 unidades\*, sendo  $L_w$  o comprimento do poço horizontal. A área da pluma de cada unidade foi estimada através da informação sobre o volume total de óleo no aquífero para cada unidade (193, 30 e 225 m<sup>3</sup> para as unidades 7, 20 e 39, respectivamente). Sale e Applegate (1997) mostram que

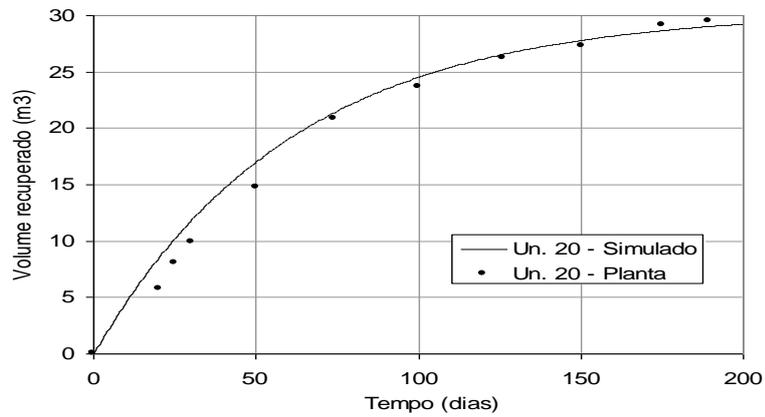
o perfil de saturação para a camada de óleo é aproximadamente constante, com saturações em torno de 65% de óleo, e essa informação foi utilizada para descrever a saturação do óleo. Com base nesta informação, estimou-se os parâmetros de Brooks-Corey para serem utilizados no cálculo das permeabilidades relativas de óleo.

**Tabela 2** – Parâmetros para a planta de recuperação de DNAPL

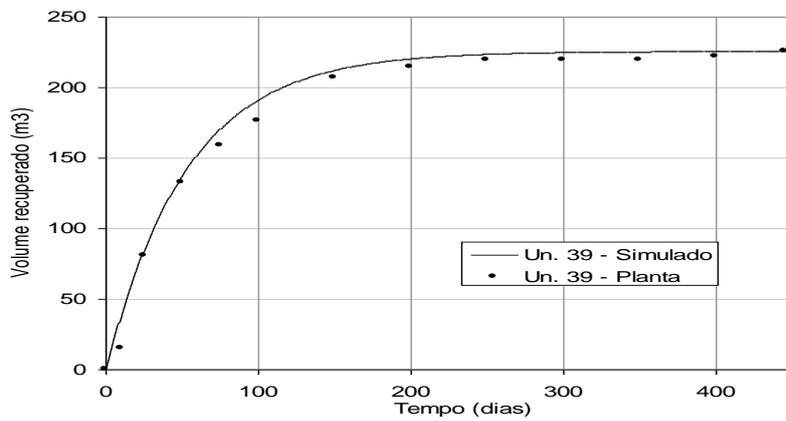
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade 7</b>	<b>Unidade 20</b>	<b>Unidade 39</b>
$\rho_{ro}$	1,03 g/cm <sup>3</sup>	1,03 g/cm <sup>3</sup>	1,03 g/cm <sup>3</sup>
$\mu_{ro}$	54 cp	54 cp	54 cp
$\phi$	0,275	0,275	0,275
$K$	15 m/dia	15 m/dia	15 m/dia
$k_{op}/k_{wp}$	10	10	5
$\lambda$	0,535	0,535	0,535
$h_d$	0,01 m	0,01 m	0,01 m
$S_r$	0	0	0
$H_o$	0,51 m	0,079 m	0,59 m
$A$	2222 m <sup>2</sup>	2462 m <sup>2</sup>	2214 m <sup>2</sup>
$D_w$	55 m	55 m	55 m
$L_w$	0,91 m	0,91 m	0,91 m
$q_w$	120 m <sup>3</sup> /dia	82 m <sup>3</sup> /dia	169 m <sup>3</sup> /dia

As Figuras 1, 2 e 3 trazem as curvas de produção geradas pelo código desenvolvido para as unidades 7, 20 e 39, respectivamente. As figuras também mostram os dados de campo (Sale e Applegate, 1997) para a recuperação do óleo em comparação com os dados simulados. Como pode-se observar, o programa simulou bastante bem os volumes recuperados para os 3 casos, ao longo de todo o período de recuperação. Os desvios com relação aos dados observados podem ser devidos, em parte, ao uso da taxa média de bombeamento de água, ao invés dos valores reais utilizados em cada tempo. Possivelmente, pode-se reduzir os desvios através do uso do esquema real de bombeamento de água de cada unidade.

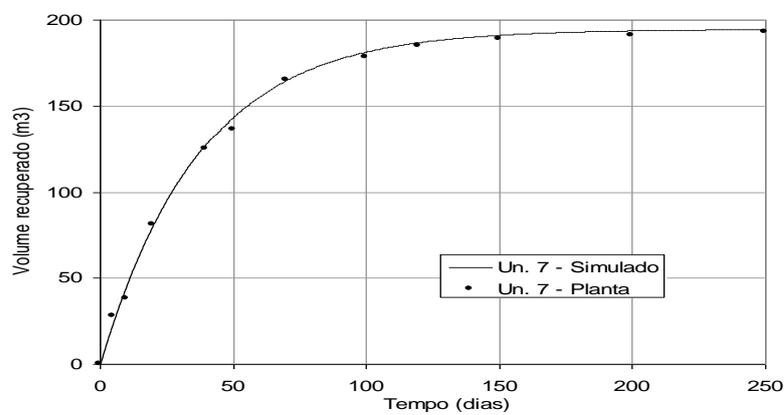
\* Dados obtidos a partir da literatura sobre o caso e de comunicação pessoal.



**Fig. 1** – Curva de recuperação simulada e real para a unidade 7.



**Fig. 2** – Curva de recuperação simulada e real para a unidade 20.



**Fig. 3** – Curva de recuperação simulada e real para a unidade 39.

A importância da redução na transmissividade da camada de óleo na redução da taxa de recuperação ao longo do tempo, pode ser visualizada quando se prediz o tempo final de recuperação, baseando-se na alta taxa de recuperação inicial. Utilizando-se a taxa inicial de recuperação, poderia-se prever que o nível de 95% de recuperação seria alcançado em 45, 100 e 66 dias para as unidades 7, 20 e 39, respectivamente. No entanto, verifica-se que os tempos reais gastos para alcançar esse nível de remediação foram de, aproximadamente, 120, 170 e 200 dias para as unidades 7, 20 e 39.

### 3. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

O modelo computacional foi desenvolvido para simular o volume recuperado de LNAPLs e DNAPLs com o tempo para um sistema de bombeamento envolvendo rebaixamento do nível da superfície freática. O modelo admite poços verticais e horizontais, com a possibilidade de incluir múltiplos poços e variar a taxa de bombeamento de água com o tempo.

A documentação dos casos utilizados para testar a eficácia da predição não apresentavam os valores de todos os parâmetros necessários, sendo preciso estimar alguns dos valores. Embora essa estimativa tenha sido feita unicamente a partir da informação do volume total de óleo no aquífero e não se tenha feito nenhum ajuste dos dados de recuperação ao longo do tempo, faz-se necessário que o programa seja testado em um caso em que todos os parâmetros tenham sido obtidos de forma independente. Outra possibilidade para completar a validação do modelo é utilizar um modelo multifásico que simule bombeamento e comparar os resultados deste modelo com os gerados pelo código desenvolvido.

Apesar das limitações na validação obtida neste trabalho, os bons resultados obtidos são um encorajamento para que os estudos sobre o modelo sejam continuados. A facilidade de uso e a simplicidade fazem com que o modelo seja uma ferramenta poderosa para projetos de plantas de recuperação de NAPLs, na fase de dimensionamento de instalações e equipamentos, na previsão de custos de instalação e operação e no acompanhamento e otimização da operação dessas plantas.

### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOUWER, H. The Bouwer and Rice slug test: an update, **Ground Water**, v.27, n.3, May-Jun. 1989.

SALE, T.C.; APPLGATE, D.H. Oil Recovery at a Former Wood-Treating Facility, **Water Environmental Research**, v.68, n.7, Nov.-Dec. 1996.

SALE, T.C.; APPLGATE, D.H. Mobile NAPL recovery: conceptual, field and mathematical considerations, **Ground Water**, v. 35, n.3, May-Jun. 1997.

**Technology Application Analysis**, Petroleum Product Recovery and Contaminated Groundwater Remediation, Amoco Petroleum Pipeline, Constantine, MI, <http://osiris.uiuc.edu/denix/Public/Library/Remediation/Amoco/>