

TRANSPORTE ADVECTIVO DE CLORETOS: ESTUDO DE CASO

Manoel Roberval Pimentel Santos¹; Maria Marlúcia Freitas Santiago²;
Luiz Alberto Ribeiro Mendonça³ & Horst Frischkorn⁴

Resumo - Com a hipótese de contaminação do Aquífero Rio da Batateira, pelos efluentes despejados no Riacho dos Macacos na cidade de Juazeiro do Norte, foram utilizados os aplicativos MODFLOW e MT3D para investigar as condições do fluxo subterrâneo e os impactos sofridos pelo aquífero. O riacho é perenizado por águas provenientes dos esgotos dos bairros vizinhos e por efluentes de pequenas fábricas localizadas nas suas proximidades. Foi utilizado como traçador de contaminação o cloreto e com as simulações realizadas verificou-se que: (i) os rebaixamentos produzidos pelo bombeamento da bateria de poços são maiores na região dos poços às margens do Riacho; (ii) a velocidade do fluxo de água subterrânea no aquífero é da ordem de 10^{-5} m/s (0,9 m/dia) e seus valores máximos ocorrem na área da bateria por causa do bombeamento dos poços; (iii) o transporte da pluma de contaminante ocorre predominantemente na vertical induzido pelo bombeamento dos poços e pela recarga do Riacho; (iv) os níveis elevados de contaminação por cloretos na região podem voltar aos valores naturais do aquífero em aproximadamente um ano, caso seja interrompido o despejo de esgoto no riacho.

Abstract – Presaming contamination of the Rio da Batateira aquifer through waste water injected into the Macacos creek in Juazeiro do Norte, we used MODFLOW and MT3D to investigate groundwater flow conditions and the impacts from the creek on groundwater. The creek turned perennial due to coast water domestic and from small industries in the neighbourhood. As a tracer for contamination we used chloride. Computational simulations show: (i) depression cones produced through pumping within a well field are more pronounced for wells close to the creek; (ii) groundwater flow velocity is of the order of 10^{-5} m/s (0,9 m/day) and the highest values occur, due to intense pumping, in the área of the well field; (iii) the plume of contamination advances predominately vertically due to pumping and induced recharge of the aquifer through the creek; (iv)

¹ Universidade Federal do Ceará, Depto. de Física, CP6030, CEP60455-760, Fortaleza, CE; fone: (085)288-9913; e-mail: roberval@fisica.ufc.br

² Universidade Federal do Ceará, Depto. de Física, CP6030, CEP60455-760, Fortaleza, CE; fone: (085) 288-9913; Fax: (085) 288-9906; e-mail: marlucia@fisica.ufc.br

³ Universidade Federal do Ceará, Depto. de Física, CP6030, CEP60455-760, Fortaleza, CE; fone: (085)288-9913; e-mail: larm@fisica.ufc.br

⁴ Universidade Federal do Ceará, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, CP6018, Fortaleza, CE, fone: (085) 288-9926.

the high level of aquifer contamination through chloride can be reduced to natural concentrations in a span of about one year in the case of stopping the injection of coast water into the Macacos creek.

Palavras-Chave - MODFLOW; MT3D; Transporte de poluentes.

INTRODUÇÃO

Uma das formas de avaliar a disponibilidade, a qualidade e a vulnerabilidade dos recursos subterrâneos é o uso de modelos que permitem representar as condições dos sistemas aquíferos e produzem resultados representativos das condições de armazenamento. Esse recurso é útil para a descrição do comportamento de fluxo de águas subterrâneas sob diversas condições de contorno.

Em termos gerais, modelos matemáticos de simulação do fluxo de água subterrânea consistem de uma equação governante, condições de contorno e iniciais. A equação principal descreve o contexto físico de ocorrência do sistema e as condições iniciais definem a distribuição de carga no início da simulação [1,2].

Este trabalho é um estudo de caso do transporte advectivo de um traçador, o cloreto, que é despejado naturalmente através de efluentes no Riacho dos Macacos, localizado na cidade de Juazeiro do Norte – CE. O estudo teve como objetivo simular a propagação da pluma de contaminante do Riacho ao aquífero Rio da Batateira. Foram utilizados dados hidrogeológicos e medidas hidrogeoquímicas das águas do Riacho e de uma bateria de poços localizados nas suas proximidades. Para a construção do modelo foram utilizados os aplicativos MODFLOW e MT3D.

ÁREA DE TRABALHO

A bateria de poços do Sistema de Abastecimento do município de Juazeiro do Norte (Figura 1), está localizada às margens do Riacho dos Macacos onde os recursos hídricos subterrâneos são uma das mais importantes fontes de água potável para abastecimento público e privado. Esta área está localizada numa planície, o Vale do Cariri, com desnível de 300 m em relação a um vasto planalto, a Chapada do Araripe [3]. A bateria de poços capta, principalmente, água no aquífero Rio da Batateira, pertencente à Bacia sedimentar do Araripe.

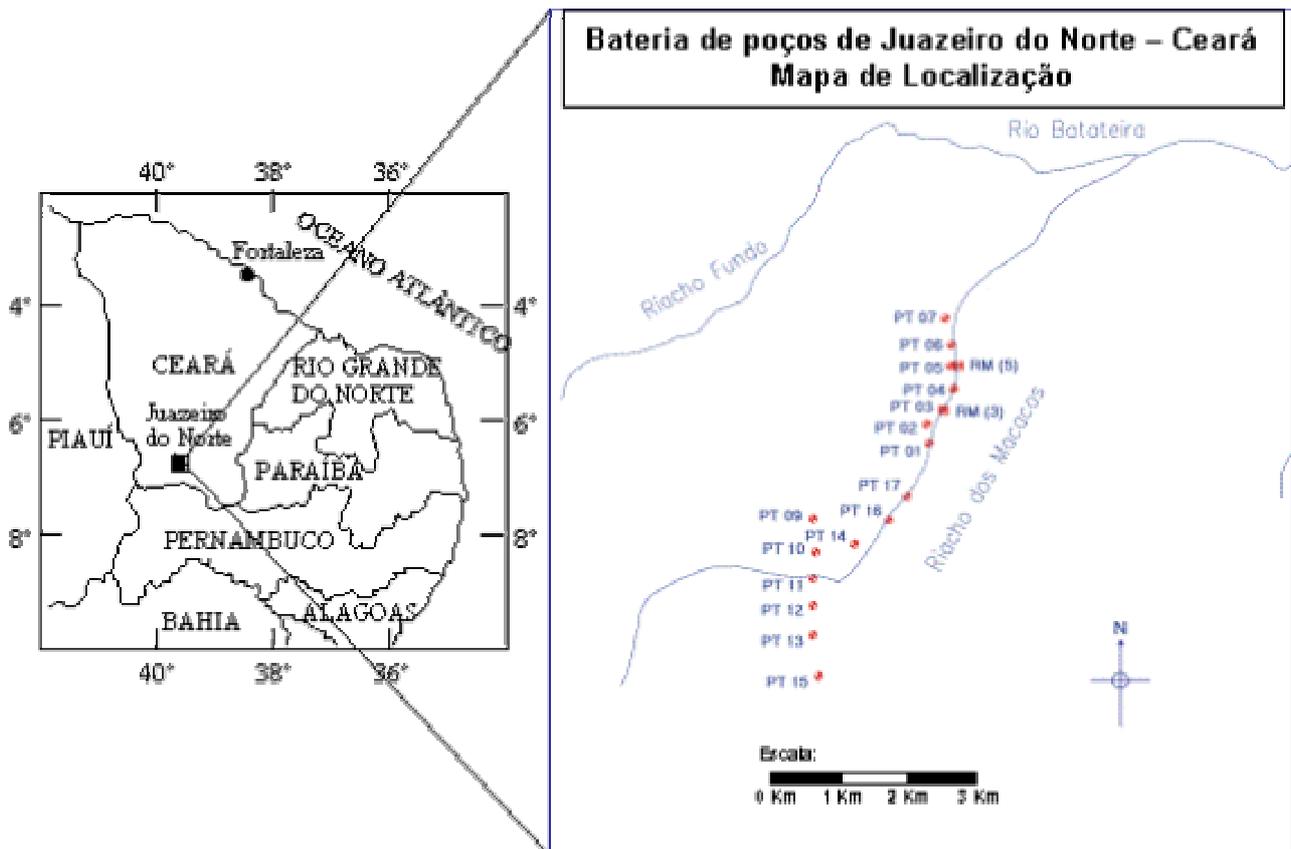


Figura 1 – Mapa de localização da bateria de poços de captação do Sistema de Abastecimento de Juazeiro do Norte [4].

Os recursos hídricos superficiais, são os riachos que drenam a região e deságuam no Rio Batateira, afluente do Rio Salgado, no alto Jaguaribe.

Geologicamente, no município de Juazeiro do Norte aflora a Formação Rio da Batateira, composta basicamente de arenitos de granulometria fina e grosseira, avermelhados e pardacentos, argilosos com intercalações de lentes de argila e folhelho. Estes arenitos são limitados na base por níveis de folhelho negro e marrom, às vezes betuminoso [5]. À aproximadamente 2 km ao norte e 7 km a nordeste da zona urbana afloram as rochas cristalinas (Morro do Horto), compostas basicamente por granitos, ardósias e filitos [6].

A estratigrafia da área dos poços, obtida através dos perfis estratigráficos, indica que a formação Rio da Batateira apresenta espessura média de 114 ± 15 m, na bateria de poços da área urbana, e de 145 ± 33 m, na bateria do Riacho dos Macacos.

O aquífero explotado é de boa produtividade, com rebaixamentos específicos nos poços variando de 1,7 a $21,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, com média de $8,3 \pm 5,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ [4]. As águas subterrâneas nas proximidades da bateria de poços apresentam escoamento em direção do Rio Batateira, com gradiente hidráulico médio de 4 ‰ [7].

METODOLOGIA

O MODFLOW

O modelo MODFLOW, desenvolvido por hidrogeólogos da U.S. Geological Survey [8], simula o fluxo tridimensional de água subterrânea através de um meio poroso usando o método de diferenças finitas e faz parte de um conjunto de modelos comerciais, de domínio público. Ele consiste de uma série de “pacotes” que quantificam as características de um sistema hidrogeológico através de drenagem, recarga, evapotranspiração e poços, e considera o sistema aquífero como sendo um conjunto de células e calcula o valor da carga hidráulica para cada célula.

O MT3D

O modelo de transporte modular tridimensional denominado MT3D foi originalmente desenvolvido por ZHENG [9] em S. S. Papadopoulos & Associates, e posteriormente documentado por Robert S. Kerr do Laboratório de Pesquisa Ambiental da U.S. Environmental Protection Agency [10]. Nos últimos anos, várias versões do código MT3D foram desenvolvidas para modelagem de transporte de contaminante. A estrutura modular do modelo de transporte permite simular quatro opções separadamente: (i) advecção, (ii) dispersão/difusão, (iii) fonte/sumidouro e (iv) reações químicas. Esta estrutura evita que os recursos de memória do computador sejam ocupados com opções não utilizadas pelo modelo.

Ele foi desenvolvido para ser usado juntamente com qualquer modelo de fluxo modular de diferenças finitas, tal como o MODFLOW, e é baseado na suposição de que as variações da concentração do contaminante na água não afetam o fluxo significativamente. O MT3D utiliza as cargas geradas por uma simulação prévia do MODFLOW para, a partir da Lei de Darcy, determinar a velocidade de percolação.

Parâmetros hidrogeológicos do aquífero

Os parâmetros hidrogeológicos foram obtidos através da análise das curvas dos testes de bombeamento, realizados em todos os poços na época de suas instalações, com a bateria ainda desativada, sem interferência de bombeamentos em poços vizinhos. A maioria dos testes foi feita com observação dos níveis dinâmicos no poço bombeado, com exceção dos poços PT 01, PT 02 e PT 05, que tiveram também os níveis observados em poços vizinhos.

A análise destas curvas foi feita com uso do aplicativo AquiferTeste e os parâmetros foram calculados através dos modelos analíticos de Jacob para aquífero confinado e de Neuman, para aquífero livre. O modelo de Jacob foi utilizado para os poços com profundidade superior a 100 m e

com ele foi determinado o parâmetro condutividade hidráulica (k). Nos dois testes que utilizaram poços vizinhos como poços de observação foi obtido o coeficiente de armazenamento (S). O modelo de Neuman foi utilizado na análise do teste de aquífero livre de um antigo poço, de apenas 50 m de profundidade, atualmente desativado, e com ele foram determinados os parâmetros condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e produção específica (Sy). As características dos poços da bateria e a condutividade hidráulica calculada para cada um deles são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos poços da bateria de Juazeiro do Norte e condutividade hidráulica.

CT: cota topográfica, TF: topo do filtro, NE: nível estático, ND: nível dinâmico após 24 h de bombeamento, r: raio do poço, Q: vazão, K: condutividade hidráulica.

Poço	Coordenadas (UTM)		CT (m)	TF (m)	NE (m)	ND (m)	r x 10 ⁻³ (m)	Q (m ³ /h)	K x 10 ⁻⁵ (m/s)
P01	466035	9200759	415	43,2	4,8	21,6	76	102	2,75
P02	466028	9201040	414	58,6	7,7	27,3	76	120	2,74
P2A	466036	9201110	410	-	-	-	-	50	-
P03	466232	9201246	413	51,1	2,5	21,1	76	120	3,48
P04	461723	9200116	393	55,9	+1,4	23,4	76	144	2,72
P05	466365	9201906	393	61,8	+1,0	29,9	76	144	2,33
P06	466375	9202231	390	87,9	+2,9	25,4	76	144	1,85
P07	466272	9202632	393	51,4	+1,6	27,6	76	120	2,17
P16	465452	9199610	435	48,3	4,7	13,9	76	198	12,70
P17	465719	9199971	409	39,8	1,4	13,1	127	214	11,90
P09	464327	9199613	457	61,4	34,6	40,0	127	33	5,78
P10	464358	9199120	432	54,1	17,3	21,5	76	48	10,30
P11	464328	9198724	424	56,1	10,5	20,4	76	66	7,98
P12	464333	9198328	428	61,8	15,4	25,3	76	113	7,47
P13	464327	9197879	443	57,2	12,3	23,3	76	59	4,72
P14	464943	9199246	432	67,5	8,9	20,4	76	158	7,59
P15	464415	9197262	425	52,3	14,6	28,8	76	88	3,81

Os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Rio da Batateira, obtidos a partir desses testes de bombeamento, estão representados na Tabela 2

Tabela 2 – Dados obtidos dos testes de bombeamento com observação em poços vizinhos. R: distância entre os poços bombeado e observado, Prof.: profundidade do poço observado, ES: espessura saturada, S: coeficiente de armazenamento e Sy: produção específica

Poço bombeado	Poço observado	R (m)	Prof. (m)	ES (m)	S x 10 ⁻⁴	Sy (%)
PT 02	PT 01	290	116	110	1,77	-
PT 05	PT 04	342	140	132	2,71	-
	PT 06	326	200	200	10,10	-
PT 01	PT 04 (antigo)	13	50	45	0,21	20

Parâmetros utilizados para a simulação do transporte de contaminante

Durante um período de 11 meses, FRANCA [11] monitorou a hidroquímica das águas dos poços às margens do Riacho dos Macacos, do Riacho e de uma lagoa nas imediações. Com base nas concentrações de cloretos (Tabela 3), foi realizada uma simulação do transporte advectivo da pluma de poluição.

Tabela 3 – Concentração de cloretos (mg/L) nas águas dos poços, lago e Riacho dos Macacos em Juazeiro do Norte - CE, nos períodos seco e chuvoso. PT: poço tubular, RM: Riacho dos Macacos vizinho aos poços PT 03 e PT 05 [11].

Data Pontos de coleta	Concentração de cloretos (mg/L)						Média em todo período
	Período Seco			Período Chuvoso			
	20/06/02	05/11/02	10/12/02	15/01/03	25/04/03	20/05/03	
PT 01	19,5	18,9	20,8	30,4	21,7	18,7	21,6
PT 02	36,0	30,2	36,5	35,2	23,9	38,7	33,4
PT 2A	74,9	71,0	38,6	64,3	59,8	83,6	65,3
PT 03	36,0	28,2	31,9	39,5	34,9	32,5	33,8
PT 04	24,3	16,5	48,7	39,8	44,1	64,2	39,5
PT 05	11,7	5,8	23,5	5,6	4,6	10,8	10,3
PT 06	17,5	17,8	23,1	35,5	19,7	21,0	21,9
PT 11	*	*	*	*	13,8	19,7	*
PT 12	*	*	*	*	10,6	12,8	*
PT 14	11,7	5,8	11,0	10,6	12,0	12,9	10,6
PT 17	7,8	8,8	12,0	10,3	5,5	15,7	10,0
RM PT.03	310,1	544,7	190,3	165,6	215,2	248,2	278,9
RM PT.05	53,5	62,0	85,6	99,4	49,7	99,0	74,8
Lago	*	*	*	*	87,2	106,3	*

* não amostrado ou não analisado

A propagação dos cloretos no aquífero depende principalmente dos fatores: advecção, dispersão, fontes/sumidouros e reações químicas. A advecção é determinada pela velocidade do fluxo, calculada com base nas cargas fornecidas pelo modelo de fluxo, e representa o principal fator do transporte. Por esse processo, a concentração de cloretos lançados no Riacho deve propagar-se na forma de uma pluma na direção preferencial do fluxo na área de interesse.

Os valores dos coeficientes de dispersão foram atribuídos considerando o perfil estratigráfico do aquífero Rio da Batateira, composto de arenito, arenito argiloso e argila. Considerando dados de dispersão em aquíferos litologicamente semelhantes ao Rio da Batateira, fornecidos por GUELHAR et al. [12], atribuiu-se às dispersividades os valores: longitudinal, $\alpha_L=1,00$ m; transversal, $\alpha_T = 0,01$ m e vertical, $\alpha_V = 0,01$ m.

O coeficiente de difusão utilizado foi de 1×10^{-9} m²/s, proposto por ROBINSON & ESTOKES [13], para íons mono e bivalentes em água subterrânea. As fontes e sumidouros foram

representados, respectivamente, pela recarga proveniente do Riacho e pelo bombeamento dos poços, que é um fator importante pelo fato deles estarem muito próximos do Riacho, contribuindo para modificar a velocidade do deslocamento da pluma. As reações químicas foram desprezadas pois os cloretos são estáveis e conservativos. Assim, não foi necessário entrar com propriedades do tipo sorção, decaimento radioativo ou biodegradação, o que simplificou o modelo.

Construção do Modelo

A simulação foi feita considerando toda a bateria de poços do Sistema de Abastecimento de Juazeiro do Norte, mas os poços às margens do Riacho dos Macacos são os que apresentam maiores problemas de poluição.

A área de domínio do modelo, de extensão 11.000 m x 13.000 m, foi escolhida de tal forma que a área de interesse, de aproximadamente 3.000 m x 6.000 m, correspondente à bateria de poços, ficasse centrada na malha para não sofrer interferência dos contornos durante as simulações. Essa área tem por base o mapa de localização dos poços de captação da CAGECE na cidade de Juazeiro do Norte, devidamente georeferenciado no AutoCad.

Para entrada de dados no MODFLOW foi criada uma malha preliminar de 100 linhas, 100 colunas e 3 camadas, alinhada na direção geral do fluxo subterrâneo, e a dimensão horizontal inicial de cada célula da malha foi de 110 m x 130 m com 20 m de espessura inicial.

Os poços da Tabela 1 foram adicionados ao modelo com seus respectivos intervalos de filtros, vazões de bombeamento e raios. Para a calibração do modelo foram fornecidas as cargas observadas nos próprios poços durante 24 horas de bombeamento.

Posteriormente, a malha foi refinada em torno da bateria de poços sem que as distâncias entre linhas adjacentes excedessem um fator de dois. Para diminuir o esforço computacional, foi aumentada a dimensão horizontal das células nas regiões distantes da bateria; desta forma, a dimensão horizontal de cada célula em torno da bateria de poços, após o refinamento, passou a ser 54,8 m por 53,2 m e nas regiões distantes da bateria, 252,5 m por 219,2 m.

Através do programa SURFER foram geradas as superfícies: do topo da camada superior, representando a superfície topográfica; do nível estático, indicando a superfície piezométrica inicial e da base da camada inferior, representando a camada argilosa que limita o aquífero explotado.

A Figura 2 mostra uma secção longitudinal ao longo de uma coluna na região dos poços da bateria. Nela aparece o limite das superfícies da base, do topo e do nível estático.

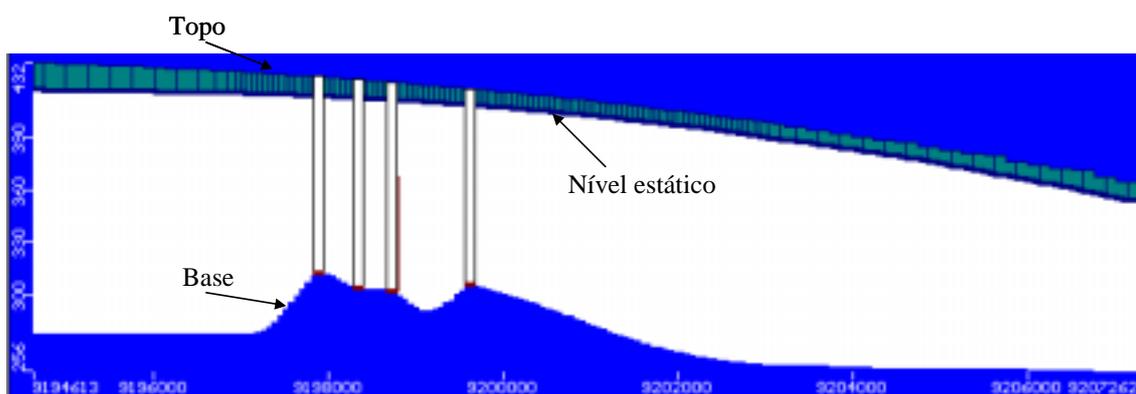


Figura 2 – Seção transversal ao longo de uma coluna, indicando o topo, o nível estático e a base do aquífero.

O meio poroso foi considerado homogêneo e isotrópico, com discretização de condutividade hidráulica na região da bateria de poços. As propriedades hidrogeológicas, condutividade hidráulica (k) (Tabela 1), coeficiente de armazenamento (S) e produção específica (S_y) (Tabela 2), obtidas dos testes de bombeamento, foram utilizadas como condições iniciais. As condutividades hidráulicas e o coeficiente de armazenamento foram ajustados durante a calibração do modelo. Como o modelo conceitual proposto considerou 3 camadas, a superior foi admitida como não confinada e as subjacentes confinadas.

Calibração

A calibração do MODFLOW foi feita com o ajuste da carga hidráulica em cada poço através de variações nas condutividades hidráulicas. No início, foi necessário atribuir um valor para cada um, que ajustasse a carga simulada pelo MODFLOW à carga observada no teste de bombeamento.

O ajuste das cargas hidráulicas no tempo, incluindo a correção das perdas de carga encontra-se no gráfico da Figura 3. Neste gráfico observa-se que o maior rebaixamento da carga ocorre no início do bombeamento devido à perda de carga no próprio poço.

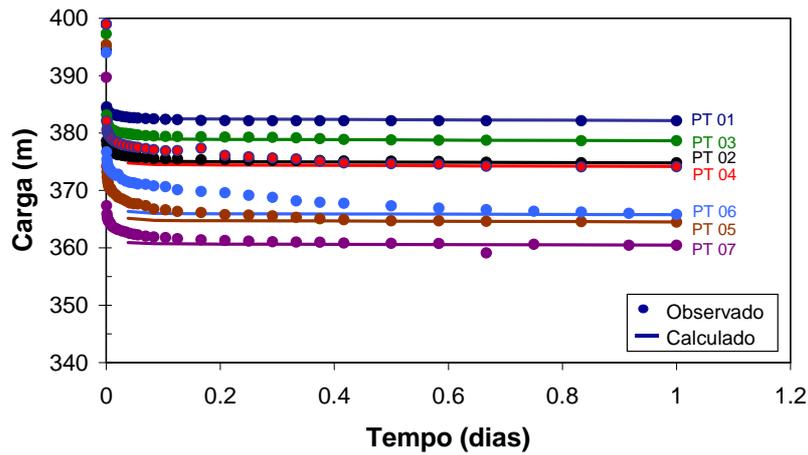


Figura 3 – Ajuste das cargas hidráulicas nos poços às margens do Riacho dos Macacos.

Na simulação, o modelo considerou inicialmente apenas o rebaixamento devido às perdas laminares no aquífero; a inclusão das perdas turbulentas no próprio poço é opcional. A Figura 4 mostra a correção das perdas incluídas no poço PT 01. Observa-se que esta correção é significativa para o ajuste das cargas.

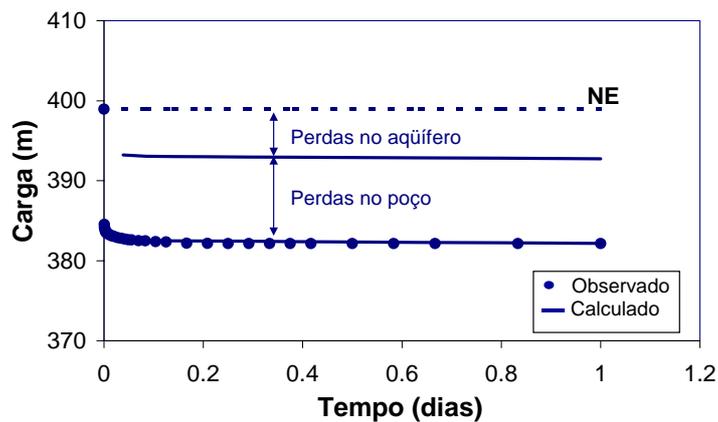


Figura 4 – Perdas de carga simuladas no poço PT 01.

No ajuste das cargas foi necessário adicionar à camada 2, em torno dos poços, uma condutividade hidráulica da ordem de 10^{-9} m/s, representando os folhelhos encontrados no perfil estratigráfico proposto por MENDONÇA [7].

O gráfico da carga hidráulica observada *versus* carga calculada, de todos os poços e a estatística de erros fornecida pelo modelo, encontra-se na Figura 5. Os dados foram obtidos no final da calibração, com correção das perdas de carga.

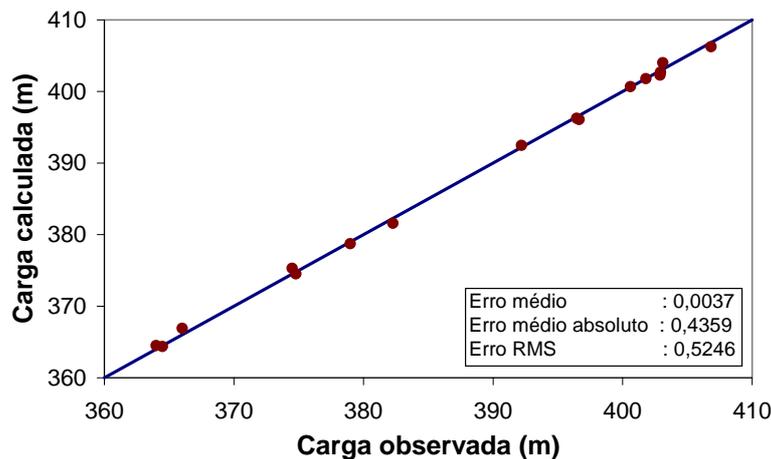


Figura 5 – Carga hidráulica calculada *versus* carga observada e estatística de erros fornecida pelo MODFLOW.

Simulação do fluxo com o MODFLOW

Após a calibração do modelo, foi realizada uma simulação de 365 dias de exploração com todos os poços da bateria bombeando com vazão máxima, tendo como condição de contorno uma recarga de 8 mm/ano. Esta recarga corresponde à média anual para áreas desmatadas no topo da Chapada do Araripe, proposta por MENDONÇA [14]. Este valor foi adotado porque não há dados de recarga na área.

Para cada célula da fronteira do domínio foi colocada uma carga constante igual ao valor da cota da superfície do nível estático, importada pelo MODFLOW, de modo que as cargas, no limite da área do domínio, permanecessem constantes no tempo.

Os resultados representativos do período de 365 dias de exploração da bateria de poços às margens do Riacho dos Macacos mostram rebaixamento que chega a 18 m e atinge uma largura máxima de aproximadamente 4,5 km e um comprimento aproximado de 8,0 km. A maior exploração do aquífero na região é feita através dos poços às margens do Riacho dos Macacos que são bombeados com vazão máxima.

O valor máximo para a velocidade de propagação do fluxo, calculado pelo MODFLOW, foi de $1,9 \times 10^{-5}$ m/s, situando-se dentro dos valores encontrados na literatura, para aquíferos compostos por arenitos com presença de argila [12].

Simulação do transporte de uma pluma de cloretos com o MT3D

A concentração natural de cloretos adotada para toda a área de domínio do modelo foi de 10 mg/L e representa a média dos valores mínimos observados nos poços da bateria, distantes da fonte poluidora. No modelo de fluxo, foi adicionada recarga pelo Riacho dos Macacos, cujo valor inicial foi de 1000 mm/ano. Este valor foi modificado durante a calibração ajustar a concentração de

cloretos calculada pelo MT3D à concentração observada em cada poço. A concentração de cloretos na recarga proveniente do Riacho foi a média dos valores em dois pontos de coleta no Riacho, no período (Tabela 3).

Para a simulação do período de 330 dias (11 meses), escolheu-se os poços PT 01 a PT 06. O valor inicial da concentração de cloretos foi a concentração natural do domínio e a concentração ajustada na calibração do modelo foi a média observada para cada poço durante o período de monitoramento.

A concentração de cloretos no Riacho não é uniforme; próximo ao poço PT 03 há uma entrada maior de esgoto, enquanto próximo ao poço PT 05, a topografia é rebaixada, com área alagada, onde o esgoto está mais diluído. Por isso, a concentração de cloretos no Riacho, a montante do poço PT 04 foi adotada como de 280 mg/L e a jusante, de 75 mg/L.

A recarga atribuída ao longo do Riacho para obter o ajuste da concentração calculada com a concentração observada foi de 16500 mm/ano. Esse valor está dentro da ordem de grandeza esperada, calculada a partir da lei de Darcy, considerando uma condutividade hidráulica de 10^{-6} m/s, para a camada argilosa superficial do aquífero e um gradiente de 1m/m, entre o nível da água no riacho e o nível dinâmico do aquífero.

A Figura 6 mostra a simulação da variação da concentração de cloreto em cada poço em função do tempo. Todos os poços localizam-se à máxima distância de 70m do Riacho, o que faz com que o deslocamento da pluma seja induzido pelo bombeamento dos mesmos. A concentração de cloretos no poço PT 2A, por ser mais raso, é mais elevada. Além disso, depois de um certo tempo, a concentração de cloretos nos poços tende a atingir um patamar por causa da mistura da água poluída, proveniente do Riacho, com a água em condições naturais, proveniente do aquífero.

A concentração de cloretos no poço PT 05 permanece praticamente igual à concentração do aquífero, por possuir camadas de folhelhos acima dos filtros (representadas no modelo pela condutividade hidráulica de 10^{-9} m/s), protegendo o aquífero da propagação da pluma. Este poço, de acordo com MENDONÇA [7], também recebe uma forte recarga por águas ascendentes, através de descontinuidades no confinamento inferior do aquífero.

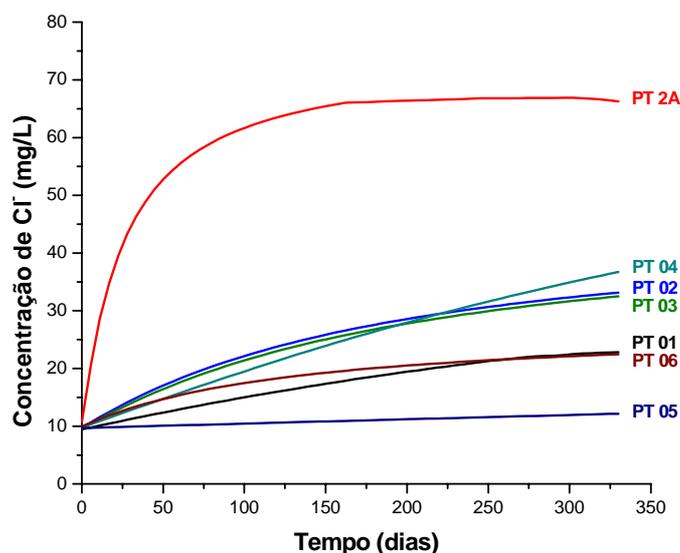


Figura 6 – Resultado da simulação da variação da concentração de cloreto com o tempo nos poços avaliados.

A Figura 7 mostra a propagação da pluma de cloretos no período de 11 meses de simulação. As diferentes cores indicam os níveis de contaminação por cloreto. Como o transporte é predominantemente advectivo, a pluma de poluição se desloca lentamente com uma velocidade da ordem de 10^{-5} m/s, e a direção predominante de propagação da pluma é induzida pelo bombeamento dos poços.

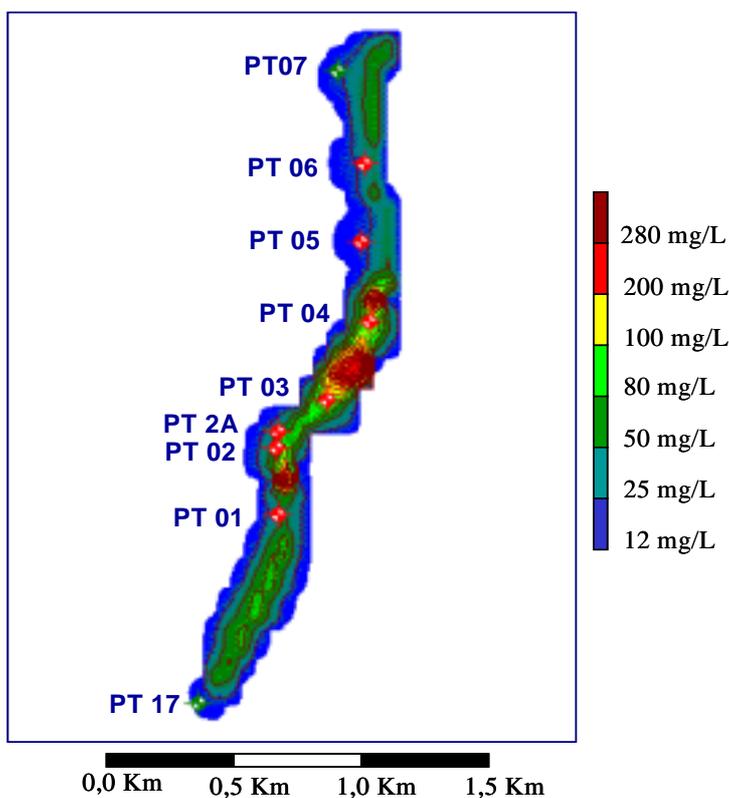


Figura 7 – Propagação da pluma de cloreto durante um período de 11 meses.

Em uma simulação de 5000 dias, mantendo a concentração da recarga pelo Riacho, observou-se que a pluma permanece na área da bateria, indicando que toda poluição proveniente do Riacho é captada pelos poços, não se propagando para outras áreas.

Uma simulação desativando a recarga proveniente do Riacho após 330 dias de contaminação, está mostrada na Figura 8. Observa-se que, cerca de um ano após a recarga pelo Riacho ter sido desativada, praticamente em todos os poços, a concentração de cloretos volta aos níveis naturais no aquífero. O bombeamento dos poços produz a retirada de água do aquífero com as concentrações mais elevadas que estão nas proximidades dos poços.

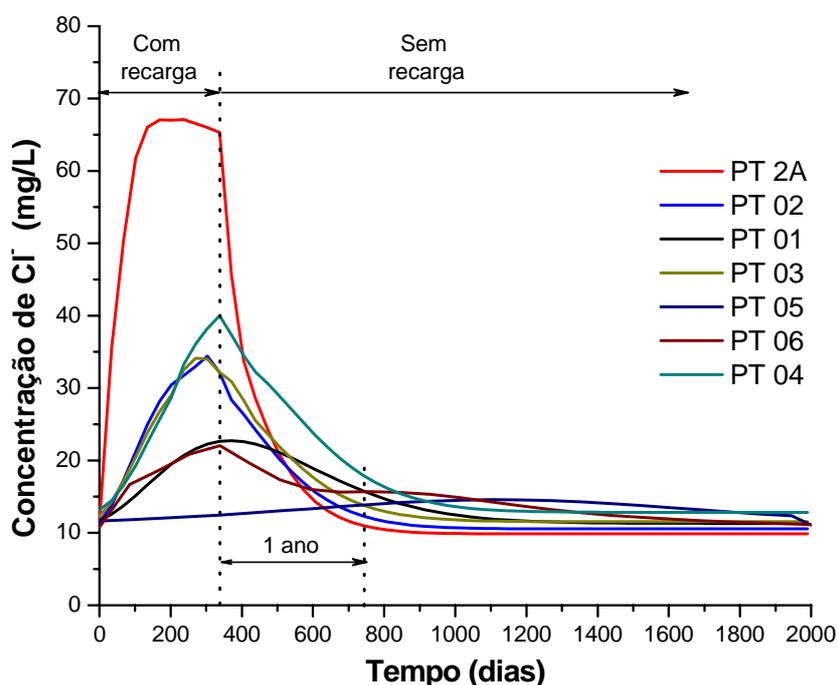


Figura 8 – Recuperação do aquífero após desativação da recarga do contaminante cloreto.

CONCLUSÕES

Analisando os resultados das simulações realizadas com o MODFLOW e com o MT3D que representam as condições do aquífero, onde estão localizados os poços de abastecimento de Juazeiro do Norte, conclui-se que:

O Riacho dos Macacos constitui o elo principal na conexão entre as águas superficiais, poluídas, e as águas subterrâneas e necessita de elevada atenção e proteção. Atualmente, ele é a principal entrada de contaminação das águas subterrâneas, funcionando como fonte persistente e contínua de poluição das águas explotadas para consumo humano.

Os rebaixamentos produzidos pelo bombeamento da bateria de poços são maiores na região dos poços às margens do Riacho dos Macacos, pelo fato deles estarem mais próximos uns dos

outros, ocasionando interferência entre eles por superposição dos cones, produzindo um grande cone de rebaixamento.

A velocidade máxima do fluxo de água subterrânea no aquífero é da ordem de 10^{-5} m/s (~ 0,9 m/dia). Os valores máximos ocorreram na região da bateria, por causa do bombeamento dos poços.

O transporte da pluma do contaminante cloreto é realizado predominantemente na vertical por causa da recarga pelo Riacho dos Macacos e do bombeamento dos poços, cujos filtros de captação encontram-se a grandes profundidades, induzindo um fluxo descendente. Isso faz com que a pluma não se desloque para áreas mais afastadas do Riacho.

Os níveis elevados de contaminação por cloretos na região podem voltar aos valores naturais do aquífero em aproximadamente um ano, caso seja interrompida o lançamento de esgoto no riacho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à URCA, COGERH, pelo apoio logístico; a Raimunda Moreira da Franca, pela coleta dos dados hidrogeológicos; e à CAPES, CNPq e FUNCAP pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDERSON, M.D. & WOSSNER, N. 1992. **Applied ground water modeling: simulation of flow and advective transport**. San Diego – CA. Ed. Academic Press Inc. 381p.
- [2] FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979. **Groundwater**. Ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- [3] DANTAS, J. R. A. & LOPES, C. F. 1995. **A bacia sedimentar do Araripe**. Recife: DNPM.
- [4] CEARÁ. 1988. Companhia de Água e Esgoto do Ceará. Diretoria Técnica. **Captação de Juazeiro do Norte** – Condição de exploração dos poços. Relatório de conclusão. Fortaleza, CE. “Datilografado”.
- [5] DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). 1996. **Projeto avaliação hidrogeológica da bacia sedimentar do Araripe**. Recife: DNPM, 103p.
- [6] CEARÁ. 1984. Companhia de Água e Esgoto do Ceará. Diretoria Técnica. **Captação de Juazeiro do Norte** – Estudo geofísico por eletroresistividade. PLANAT. Fortaleza, CE. “Datilografado”.
- [7] MENDONÇA, L. A. R. 1996. **Modelagem matemática, química e isotópica de uma bateria de poços na cidade de Juazeiro do Norte – Ceará**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil – Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. 122p.

- [8] McDONALD, M. G. & HARBAUGH, A. W. 1988. **A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model (MODFLOW)**. Washington: Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geol. Survery. Book 6.
- [9] ZHENG, C. 1990. **MT3D, a modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems**. Report to the U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK.
- [10] ZHENG, C. & WANG, P. P. 1999. A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems (MT3DMS); documentation and user's guide. Environmental Laboratory. U.S. Army Engineer Research and Development Center. Washington.
- [11] FRANCA, R. M. 2004. **Diagnóstico sanitário das águas do Riacho dos Macacos e de uma bateria de poços nas suas imediações - Município de Juazeiro do Norte – Ceará**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil – Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- [12] GELHAR, L. W., WELTY, C.; REHFELDT, K. R. 1992. A critical Review of data on field-scale dispersion in aquifers. **Water Resources Res.** 28(7): 1955-1974.
- [13] ROBINSON, R. A. & STOKES, R. H., 1965. **Electrolyte Solutions**, 2nd ed. Ed. Butterworth, London.
- [14] MENDONÇA, L. A. R. 2001. **Recursos hídricos da chapada do Araripe**. 2001. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil – Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. 193p.