

# ANÁLISE AMBIENTAL DE UMA BATERIA DE POÇOS ATRAVÉS DE MODELAGEM MATEMÁTICA E MEDIDAS BACTERIOLÓGICAS

Manoel Roberval Pimentel Santos<sup>1</sup>; Luiz Alberto Ribeiro Mendonça<sup>1</sup>; Maria Marlúcia Freitas Santiago<sup>1</sup>; Raimunda Moreira da Franca<sup>2</sup>; Horst Frischkorn<sup>2</sup> & Josué Mendes Filho<sup>1</sup>

**Resumo** - A cidade de Juazeiro do Norte é abastecida, basicamente, através de um conjunto de poços alinhados ao longo do Riacho dos Macacos. Nos últimos anos o Riacho perdeu sua vazão natural e virou esgoto. Alguns dos poços na sua vizinhança mostraram poluição bacteriana. Usamos o programa MODPATH em conjunto com o MODFLOW para simular o transporte advectivo de partículas da fonte de poluição até o topo do filtro dos poços. Os resultados mostram o tempo mínimo de transporte variando de 15 a 100 dias dependendo da distância poço/fonte. Esses valores indicam uma forte conexão entre o aquífero e as águas superficiais poluídas, explicando a presença de coliformes em amostras d'água coletadas nos poços.

**Abstract** - The township of Juazeiro do Norte is supplied with water mainly from a well field aligned along the Riacho dos Macacos creek. During recent years, this creek lost its natural flow and become a sewer. Some of the wells in its vicinity show bacterial contamination. We used the computational program MODPATH together with MODFLOW for the simulation of advective particle transport from the source of contamination to the filters of the wells. Results show times of transit between 15 and 100 days. These values indicate a strong interaction between ground water and polluted surface waters and explain the presence of coliform bacteria in samples from same wells.

**Palavras-chave** - MODFLOW, MODPATH, coliformes, contaminação, super exploração.

---

<sup>1</sup> Departamento de Física da UFC; Tel.: (0xx) 85 288.9913, Fax: (0xx) 85 288.9906; e-mail: marlucia@fisica.ufc.br.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC, Caixa Postal 6018, CEP 60451-970, Fortaleza-CE; Tel.: (0xx) 85 288.9623, Fax: (0xx) 85 2889727; e-mail: cariri@ufc.br.

## **INTRODUÇÃO**

A cidade de Juazeiro do Norte, localizada no extremo sul do Estado do Ceará, é abastecida, principalmente, por duas baterias de poços tubulares. Uma com 6 poços, com capacidade máxima total de 407 m<sup>3</sup>/h, localizada em área urbana; e outra com 11 poços, com capacidade máxima total de 1.511 m<sup>3</sup>/h, localizada às margens do Riacho dos Macacos, no Parque Ecológico das Timbaúbas. Estes poços são operados pela CAGECE (Companhia de Água e Esgotos do Estado do Ceará) e captam o aquífero Rio da Batateira.

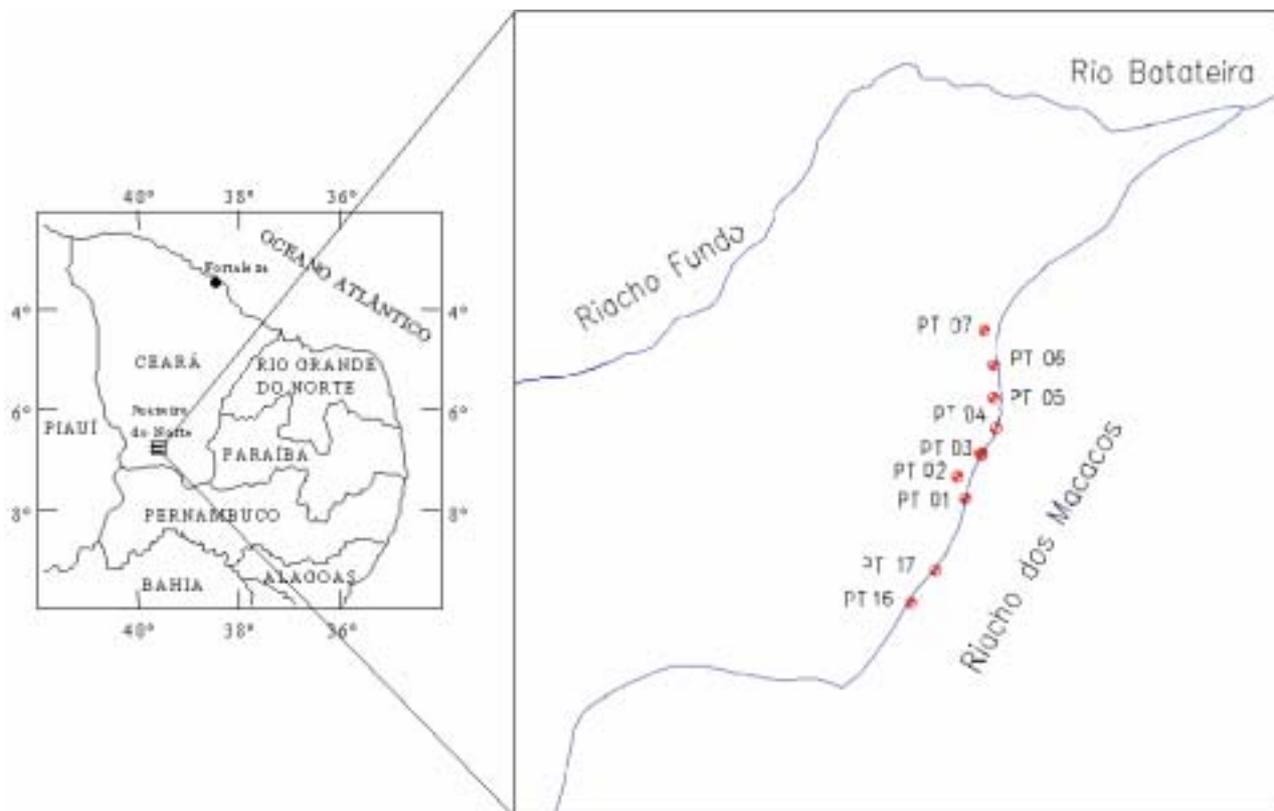
Na década de 70, durante a perfuração dos primeiros 7 poços da bateria do Riacho dos Macacos, 4 deles jorraram com altura máxima de aproximadamente 3 m. Na década de 80, antes da implantação total das duas baterias de poços, havia água farta. O Riacho dos Macacos era perene e alguns poços particulares e lagoas, existentes em suas imediações, nunca haviam secado. Mas após 1990, com as duas baterias operando 24 horas/dia, o Riacho dos Macacos, bem como as lagoas e poços particulares secaram. Em períodos chuvosos, tanto o riacho quanto as lagoas se recuperam parcialmente, mas não há realimentação capaz de atingir as condições anteriores à construção da bateria de poços.

Com o aumento populacional dos bairros em torno do Parque Ecológico das Timbaúbas, o Riacho dos Macacos passou a conduzir águas provenientes de esgotos domésticos. Análises bacteriológicas de águas coletadas em alguns poços localizados nas proximidades do riacho e de lagoas apresentaram coliformes fecais, indicando uma rápida contribuição de águas poluídas para o aquífero.

No presente estudo foi utilizado o aplicativo MODPATH, do Visual MODFLOW, para investigar as conexões hidráulicas entre os mananciais superficiais poluídos e as águas subterrâneas. Com este aplicativo foram traçadas as trajetórias percorridas por partículas, em transporte advectivo, através do aquífero e assim, encontrado o tempo que as partículas levam para atingir os filtros dos poços. Através dos resultados obtidos foi possível avaliar o impacto potencial causado pela falta de saneamento na área e pela elevada exploração do aquífero.

## **ÁREA DE TRABALHO**

A bateria de poços do Riacho dos Macacos no município de Juazeiro do Norte (Figura 1) encontra-se numa região onde os recursos hídricos subterrâneos é a única fonte de água potável para abastecimento público e privado. Esta região está localizada numa planície, o Vale do Cariri, com desnível de 300 m em relação a um vasto planalto, a Chapada do Araripe.



**Figura 1** – Localização da área de trabalho e dos poços da bateria do Riacho dos Macacos.

De acordo com o IBGE, o município de Juazeiro do Norte possui área territorial de apenas 235 km<sup>2</sup> e uma população superior a 200.000 habitantes com 95% residindo em área urbana.

Nesta região as temperaturas médias anuais variam de 25° a 30°C e a precipitação média é de aproximadamente 1.000 mm/ano. Segundo a classificação de Köeppen (1948), o clima da região é do tipo Aw tropical úmido com uma estação chuvosa. A vegetação na área é do tipo caatinga arbórea e mata seca.

Os recursos hídricos superficiais, são os riachos que drenam a região 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 a grosseiros 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 (DNPM, 1996). A aproximadamente 2 km ao norte (Morro do Horto) e 7 km a nordeste da zona urbana afloram as rochas cristalinas, compostas basicamente por granitos, ardósias e filitos (Ceará, 1984).

A estratigrafia geológica da área dos poços, obtida através dos perfis estatigráficos, 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 explorado é de boa produtividade, com rebaixamentos específicos nos poços variando de 1,7 a 21,7 m<sup>3</sup>/h/m com média de 8,3 ± 5,3 m<sup>3</sup>/h/m (Ceará, 1988) e com as águas subterrâneas nas proximidades das baterias de poços apresentam escoamento em direção do Rio Batateira, com gradiente hidráulico médio de 4 ‰ (Mendonça, 1996).

## METODOLOGIA

### Uso do MODPATH

O MODPATH (Pollock, 1994) traça o percurso de partículas por transporte advectivo utilizando as cargas hidráulicas calculadas previamente pelo MODFLOW. O percurso é determinado entre células vizinhas até alcançar um contorno, uma fonte ou sumidouro.

O movimento tridimensional do fluxo subterrâneo, de densidade constante, no estado estacionário é descrito pela equação diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x}(n_{ef}v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(n_{ef}v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(n_{ef}v_z) = W,$$

onde  $v$  é a velocidade,  $n_{ef}$  a porosidade efetiva e  $W$  o fluxo volumétrico por unidade de volume, representando fonte e/ ou sumidouro.

Os componentes principais do vetor velocidade nos nós de uma malha de diferenças finitas, considerando o movimento na direção  $x$  de uma partícula  $p$ , são determinados através da interpolação linear

$$v_x = A_x(x - x_1) + v_{x1},$$

onde  $A_x$  é o gradiente de velocidade na célula.

Como a aceleração e a velocidade, em cada célula, são descritas por

$$\left(\frac{dv_x}{dt}\right)_p = \underbrace{\left(\frac{dv_x}{dx}\right)}_{A_x} \underbrace{\left(\frac{dx}{dt}\right)_p}_{v_{xp}},$$

por integração, obtém-se a posição da partícula

$$x_p(t_2) = x_1 + \left(\frac{1}{A_x}\right) \{v_{xp}(t_1) \exp(A_x \Delta t) - v_{x1}\}.$$

As equações para as direções  $y$  e  $z$  são análogas.

Desta forma, com uso do MODPATH é possível obter não só a posição da partícula como também o tempo que ela leva para realizar o percurso.

## 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 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 todos os poços da bateria com profundidade superior a 100 m e com ele foram determinados os parâmetros condutividade hidráulica ( $k$ ) e o coeficiente de armazenamento ( $S$ ). O modelo de Neuman foi utilizado em um antigo poço, de apenas 45 m de profundidade, atualmente desativado. Com ele foram determinados os parâmetros condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e produção específica ( $S_y$ ).

Para o cálculo do transporte advectivo é necessário conhecer a porosidade efetiva ( $n_{ef}$ ). Como em aquífero livre a liberação da água por bombeamento se dá tanto pela compactação do aquífero e expansão da água quanto pela drenagem gravitacional, a produção específica pode ser escrita como  $S_y = S + n_{ef}$ . Como o  $S$  é muito pequeno, comparado com os outros termos da equação, admite-se  $S_y \cong n_{ef}$ .

## Correção das perdas de carga no poço durante a calibração do MODFLOW

Na simulação dos rebaixamentos obtidos durante os testes de bombeamento, com observação no próprio poço, a carga foi corrigida com base nas equações de Theim desenvolvidas para aquíferos livres e confinados. No MODFLOW elas são descritas pela equação:

$$h_w^2 \sum_{\text{não conf.}} k_i + 2h_w \sum_{\text{conf.}} k_i \Delta z_i - \sum_{\text{não conf.}} k_i h_i^2 - 2 \sum_{\text{conf.}} k_i \Delta z_i h_i = -\frac{Q_w}{\pi} \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right)^2,$$

onde  $h_w$  é a carga no poço,  $h$  a carga na célula,  $Q_w$  a vazão de bombeamento,  $k$  a condutividade hidráulica,  $r_w$  o raio do poço e  $r_e$  o raio de influência do cone de rebaixamento. Desta forma, para a correção das perdas, o modelo solicita, apenas, o raio do poço. Segundo Anderson e Wossner (1992), esta fórmula pode ser aplicada em simulações transientes assumindo-se que, depois de um pequeno período de tempo, o armazenamento da água próximo ao poço é desprezível.

No método de diferenças finitas, as células que possuem cargas hidráulicas acima do topo são confinadas e as que possuem cargas menores ou iguais ao topo são não confinadas.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Simulação

#### *Entrada de dados*

A simulação foi feita considerando apenas a bateria de poços do Riacho dos Macacos, que apresenta problemas ambientais.

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, que corresponde à bateria de poços, ficasse centrada na malha para não sofrer interferência dos contornos durante as simulações.

Para entrada de dados no MODFLOW, foi criada uma malha preliminar de 100 linhas, 100 colunas e 5 camadas, alinhada na direção geral do fluxo subterrâneo. Desta forma, a dimensão horizontal inicial de cada célula da malha foi de 110 m por 130 m (Figura 2). Posteriormente, esta malha foi refinada em torno da bateria de poços para melhorar a definição dos rebaixamentos da superfície potenciométrica. Este refinamento foi feito considerando que as distâncias entre linhas adjacentes não excedessem um fator de dois. Desta forma, a dimensão horizontal de cada célula em torno da bateria de poços passou a ser 27,5 m por 32,5 m. O mapa com a bateria de poços e o Riacho dos Macacos devidamente georreferenciado foi importado para o MODFLOW.

Através do programa SURFER foram criadas superfícies para o topo da camada superior, representando a superfície topográfica, para o nível estático, indicando a superfície potenciométrica inicial e para a base da camada inferior, representando a camada argilosa que limita o aquífero explorado. Estas superfícies foram importadas pelo MODFLOW para delimitar o aquífero na vertical e estão indicadas na Figura 2.

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.

O meio poroso foi considerado homogêneo e isotrópico. As propriedades hidrogeológicas condutividade hidráulica ( $k_1$ ) na Tabela 1, coeficiente de armazenamento específico ( $S_{S1}$ ) e produção específica ( $S_y$ ), na Tabela 2, obtidos dos testes de bombeamento, foram utilizados como iniciais. A condutividade hidráulica e o coeficiente de armazenamento foram ajustados durante a calibração do modelo. Como o modelo conceitual proposto considerou 5 camadas, a superior foi admitida como não confinada e as subjacentes confinadas.

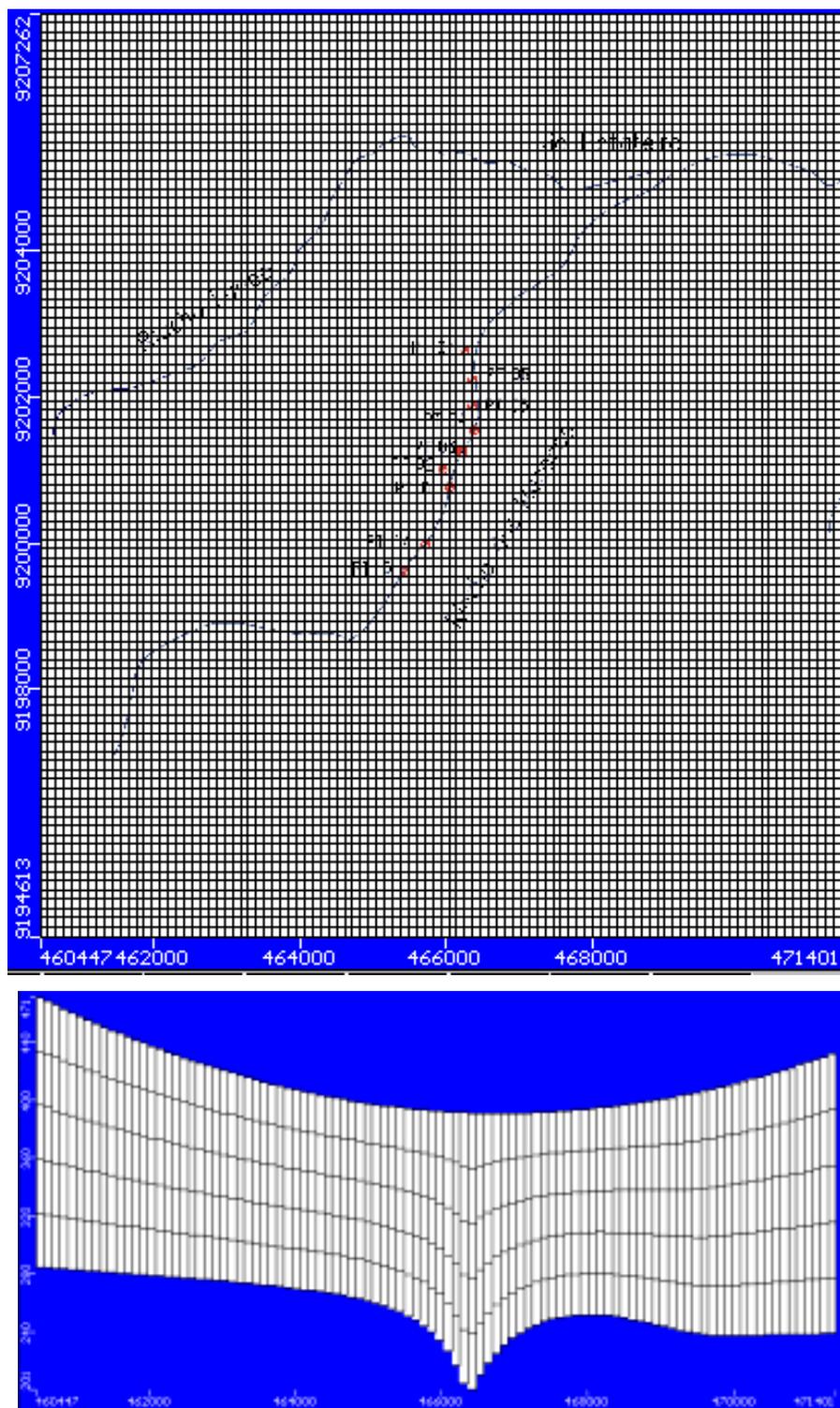
**Tabela 1** – Dados dos poços da bateria do Riacho dos Macacos. CT: cota topográfica, TF: topo do filtro, NE: nível estático, ND: nível dinâmico após 24 h de bombeamento, r: raio do poço, k: condutividade hidráulica (onde os índices 1 e 2 correspondem aos valores iniciais e ajustados na calibração, respectivamente).

Poço	Coordenadas (UTM)		CT (m)	TF (m)	NE (m)	ND (m)	r x 10 <sup>-3</sup> (m)	Q (m <sup>3</sup> /h)	k <sub>1</sub> x 10 <sup>-5</sup> (m/s)	k <sub>2</sub> x 10 <sup>-5</sup> (m/s)
PT 01	466035	9200759	415	43,2	4,8	21,6	76	102	2,75	2,70
PT 02	466028	9201040	414	58,6	7,7	27,3	76	120	2,74	2,05
PT 03	466232	9201246	413	51,1	2,5	21,1	76	120	3,48	2,70
PT 04	461723	9200116	393	55,9	+1,4	23,4	76	144	2,72	2,74
PT 05	466365	9201906	393	61,8	+1,0	29,9	76	144	2,33	1,57
PT 06	466375	9202231	390	87,9	+2,9	25,4	76	144	1,85	1,84
PT 07	466272	9202632	393	51,4	+1,6	27,6	76	120	2,17	1,85
PT 16	465452	9199610	435	48,3	4,7	13,9	76	198	12,70	10,70
PT 17	465719	9199971	409	39,8	1,4	13,1	127	214	11,90	13,90

**Tabela 2** – Dados obtidos dos testes de bombeamento com observação em poços vizinhos. R: distâncias entre os poços bombeado e observado, S: coeficiente de armazenamento, ES: espessura saturada, S<sub>s</sub>: coeficiente de armazenamento específico e S<sub>y</sub>: produção específica (onde os índices 1 e 2 correspondem aos valores iniciais e ajustados na calibração, respectivamente).

Poço bombeado	Poço observado	R (m)	S <sub>1</sub> x 10 <sup>-4</sup>	ES (m)	S <sub>s1</sub> x 10 <sup>-6</sup> (m <sup>-1</sup> )	S <sub>s2</sub> x 10 <sup>-6</sup> (m <sup>-1</sup> )	S <sub>y</sub> (%)
PT 01	PT 04 antigo	13	-	45	2,4	-	8
PT 02	PT 01	290	1,77	110	1,61	3,00	10
PT 05	PT 04	324	2,71	132	2,05	3,00	10

A primeira simulação do caminho advectivo de partículas, representando o período seco, foi feita considerando um ano de bombeamento, sem recarga e com a vazão máxima proposta para a bateria. Nesta simulação, foram introduzidos, na camada superior do aquífero, círculos de partículas de raio igual à distância de cada poço ao Riacho dos Macacos ou à Lagoa, com o poço centrado, (Tabela 3).



**Figura 2** – Malha para a simulação da bateria de poços do Riacho dos Macacos.

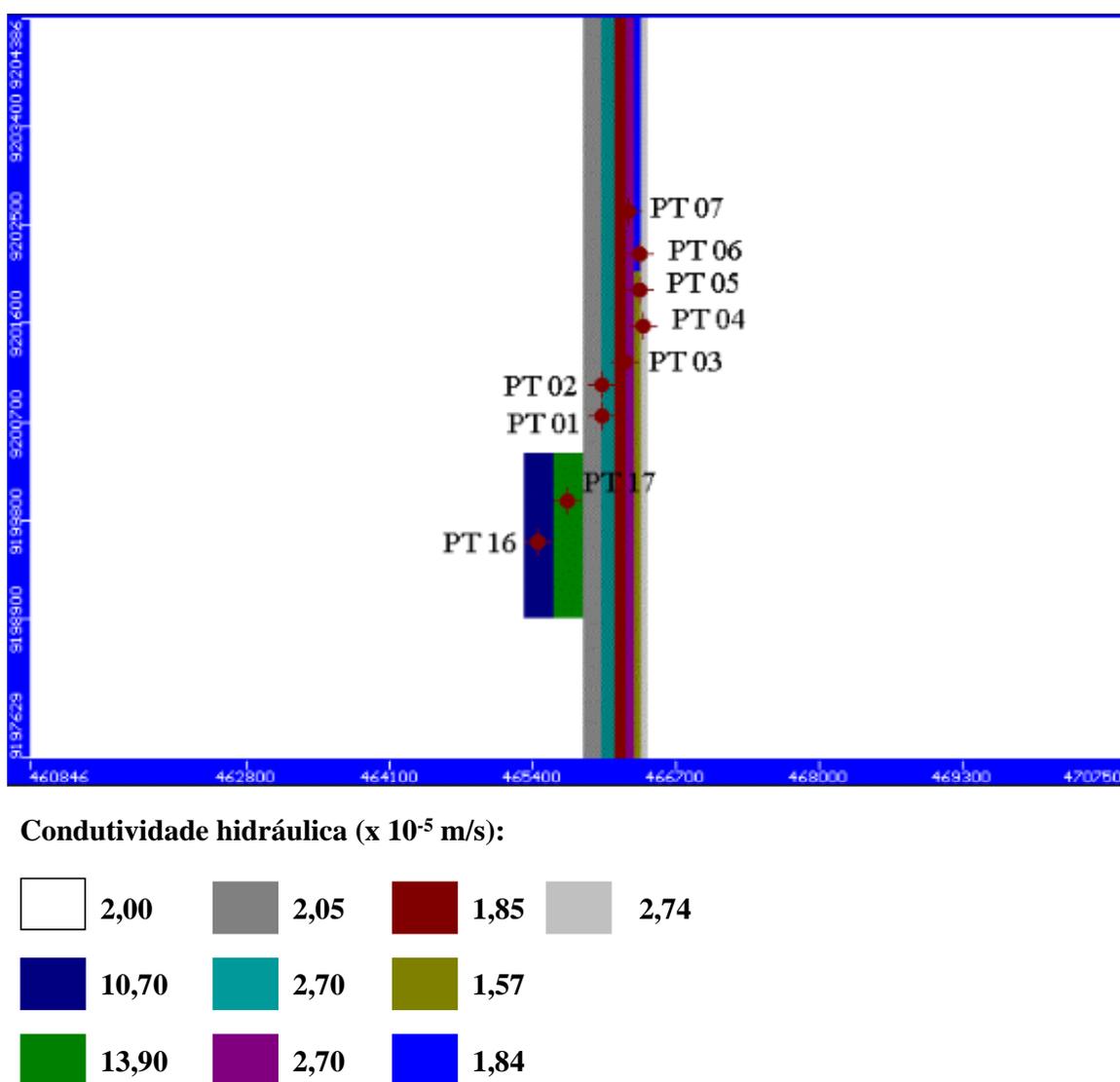
**Tabela 3** – Poços que apresentaram coliformes em suas águas e distância ao manancial poluído.

Poço	Manancial poluído	Distância (m)
PT 02	Riacho	70
PT 03	Riacho	13
PT 05	Riacho	63
PT 06	Riacho	42
PT 17	Lagoa	27

Numa segunda simulação, representando o período chuvoso, adotou-se uma recarga de 8 mm/ano em todo o domínio do modelo. Esta recarga corresponde à média anual para áreas desmatadas no topo da Chapada do Araripe, proposta por Mendonça (2001). Este valor foi adotado porque não há dados de recarga na área. As cargas iniciais para esta simulação foram as obtidas no final da primeira simulação.

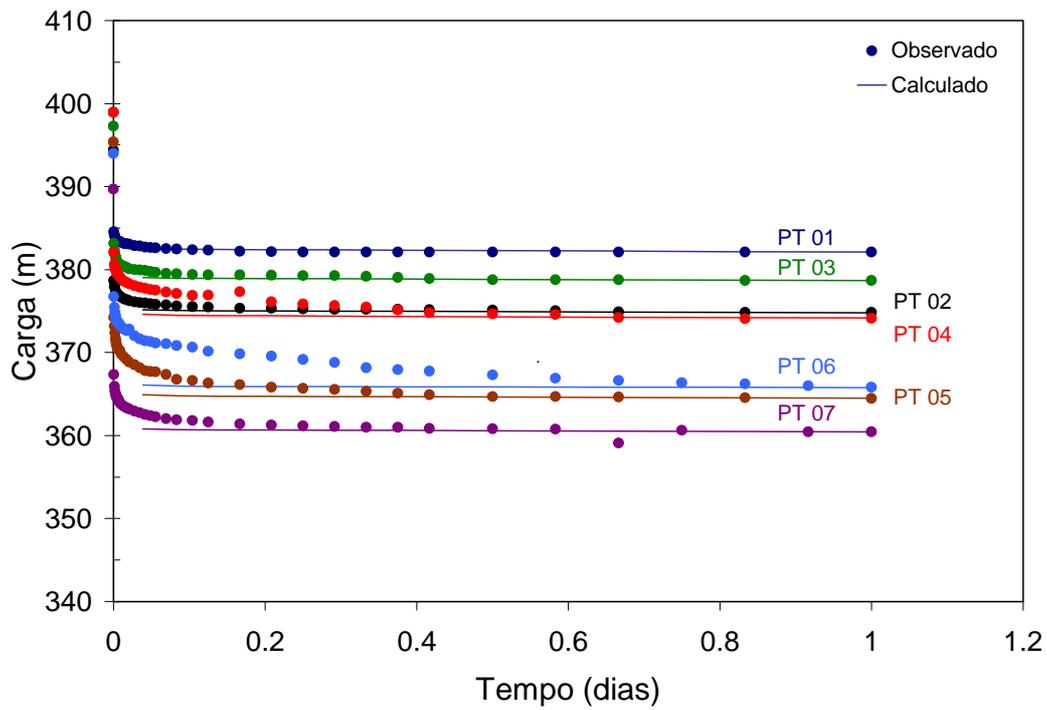
### Calibração

As condutividades hidráulicas ( $k_2$ ) e o coeficiente de armazenamento específico ( $S_{S2}$ ) ajustados em cada poço, durante a calibração, estão mostradas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. As condutividades hidráulicas foram distribuídas na área de acordo com a Figura 3.

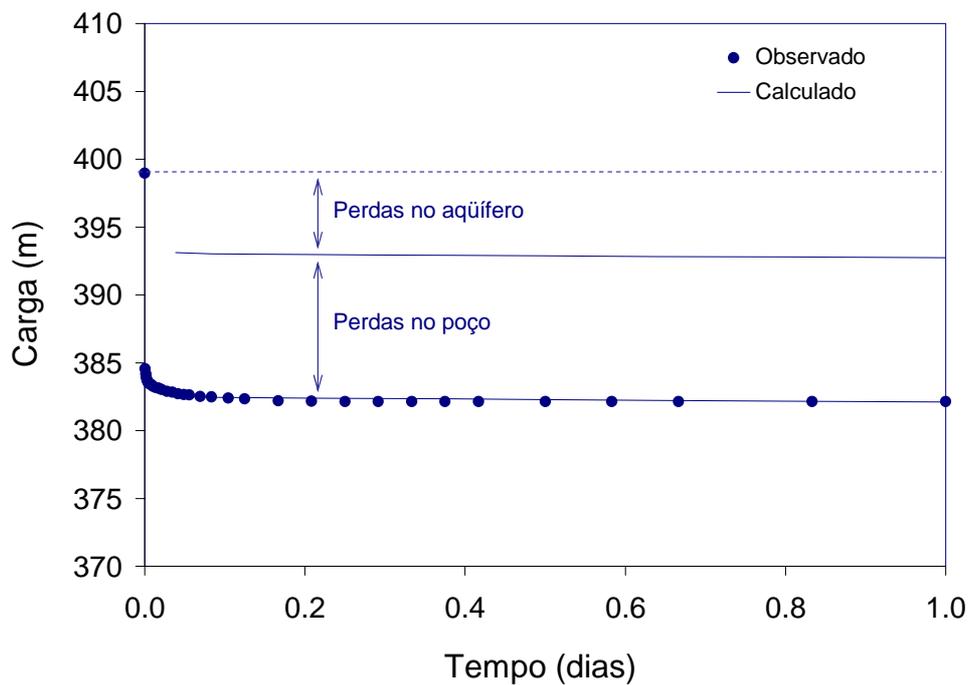


**Figura 3** – Condutividades hidráulicas distribuídas na área.

O ajuste das cargas hidráulicas no tempo, incluindo a correção das perdas de carga em cada poço, está mostrado na Figura 4 e um exemplo da correção das perdas na Figura 5.



**Figura 4** – Ajuste das cargas hidráulicas em cada poço.

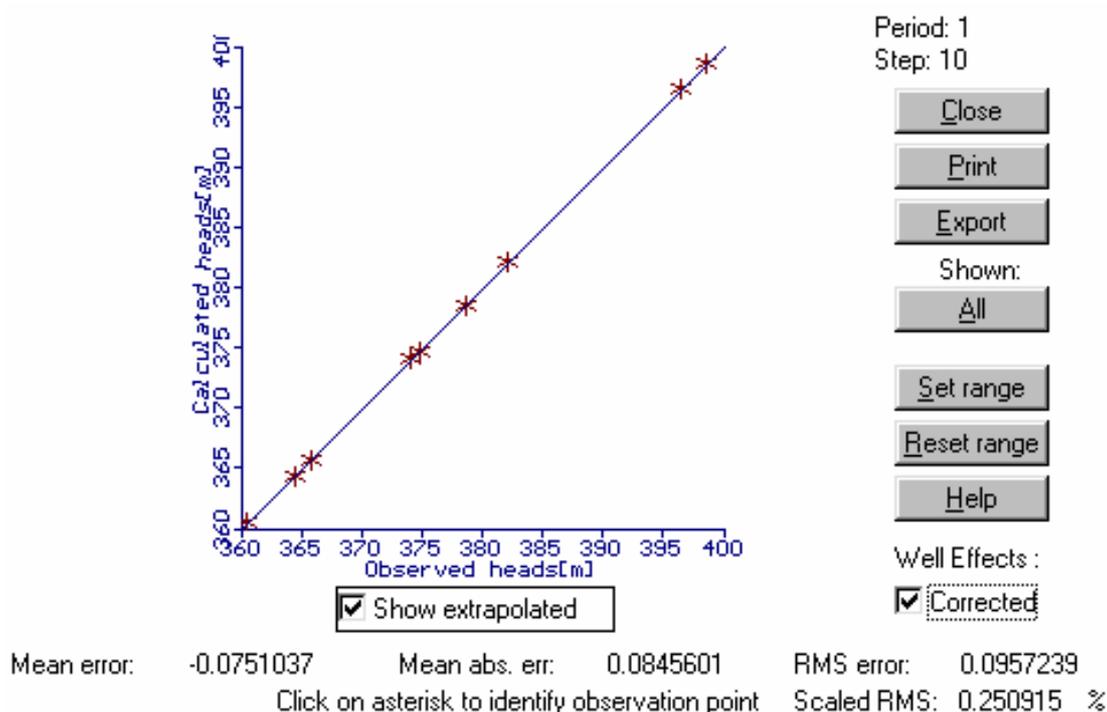


**Figura 5** – Perdas de carga simuladas no poço PT 01.

Todos os poços apresentaram um bom ajuste, no final do bombeamento. Apenas os poços PT 04, 05, 06 e 07 apresentaram desvios consideráveis no início. Estes poços estão localizados nas proximidades de uma descontinuidade na camada argilosa da base do aquífero. Esta descontinuidade propicia o surgimento de um fluxo ascendente, proveniente do aquífero confinado

mais profundo, que contribui significativamente para a redução do rebaixamento no início do bombeamento destes poços (Mendonça, 1996). Como o modelo aqui proposto só considera o aquífero Rio da Batateira, esta influência não foi levada em conta.

O gráfico, carga hidráulica observada *versus* calculada para todos os poços, obtido no final da calibração, com correção das perdas de carga, juntamente com a estatística fornecida pelo modelo, encontra-se na Figura 6. Os resultados indicam um bom ajuste.

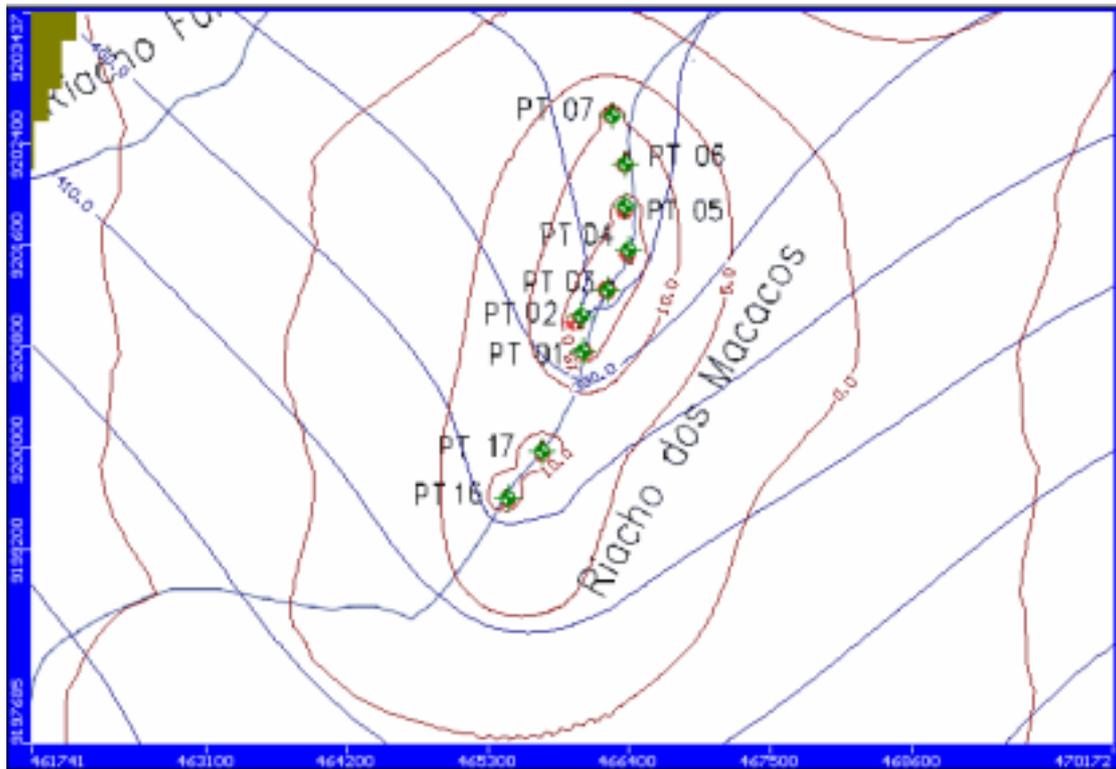


**Figura 6** – Carga hidráulica observada versus calculada no final da calibração.

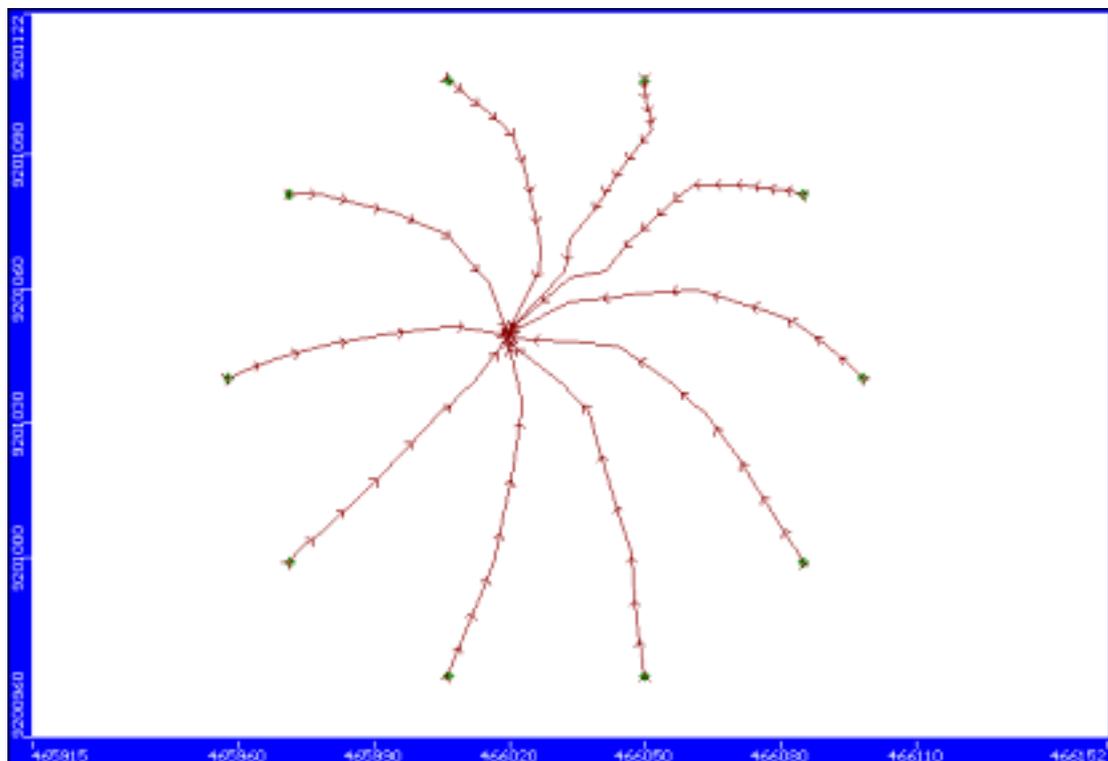
#### *Determinação das cargas, trajetórias das partículas e tempo de trânsito*

As linhas equipotenciais e os rebaixamentos obtidos na simulação de um ano de exploração da bateria, sem recarga e com os poços bombeando com vazão máxima, estão mostrados na Figura 7. Para uma melhor visualização dos resultados foi dado um *zoom* na área de interesse.

A Figura 8 mostra as linhas de trajetória das partículas mergulhando em direção ao filtro do poço PT 02. Os intervalos entre setas nas linhas indicam intervalos de tempo de 15 dias. Assim, observa-se que as partículas levam um tempo de aproximadamente 100 dias para atingir o filtro do poço. Esta mesma metodologia foi aplicada a cada poço da Tabela 3, considerando o período chuvoso com recarga de 8 mm/ano. Os resultados dos tempos mínimos que as partículas levam para atingir cada poço no período seco e chuvoso estão apresentados na Tabela 4.



**Figura 7** – Linhas equipotenciais (azuis) e rebaixamento (vermelho) calculadas em torno da bateria de poços.



**Figura 8** – Linhas de trajetória das partículas em direção ao poço PT 02

**Tabela 4** – Tempo mínimo que as partículas levam para atingir o filtro dos poços em transporte advectivo.

Poço	Tempo (dias)	
	Período seco	Período chuvoso
PT 02	100	100
PT 03	20	30
PT 05	80	80
PT 06	100	100
PT 17	15	15

Os tempos para as partículas atingirem os filtros dos poços são relativamente pequenos, principalmente nos poços PT 03 e PT 17, mais próximos das fontes poluidoras. Considerando a meia vida de coliformes em água subterrânea de aproximadamente 8 dias (Edberg et al, 1997), e os tempos determinados, é provável obter concentrações consideráveis de coliformes nas águas explotadas pelos poços. Como mostra a Tabela 5, o poço PT 17, com o menor tempo de trânsito, mostra contaminação bacteriana mais elevada.

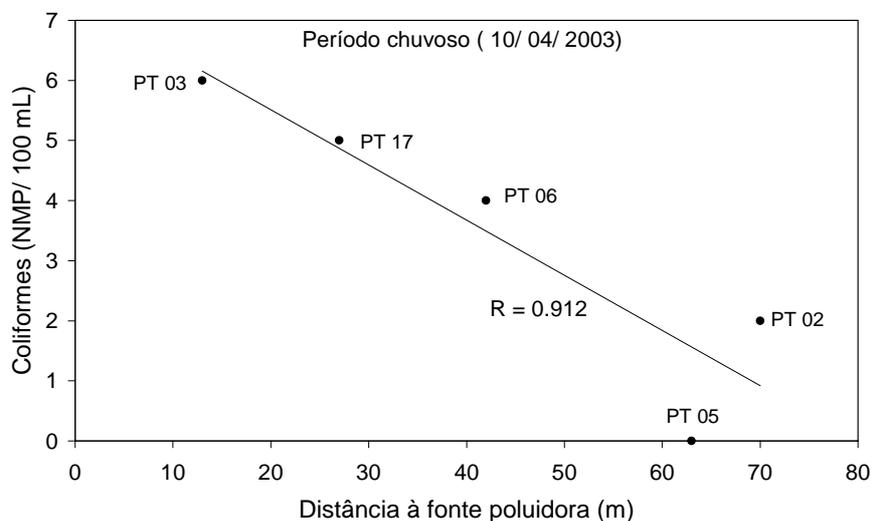
Segundo Auer e Niehaus (1993), as bactérias do grupo coliforme, em um dado ambiente, têm seu decaimento acelerado por agentes físicos, químicos e biológicos, dentre elas a radiação solar, a temperatura, o pH, a salinidade e a bacteriofagocitose, principalmente pelos dois primeiros. No caso da água, o decaimento pode ser mais lento em ambiente turvo ou escuro com temperatura próxima a da atmosfera e nas águas subterrâneas rasas as bactérias estão protegidas de agentes que aceleram o decaimento.

**Tabela 5** – Concentrações de coliformes em poços e no Riacho dos Macacos (A: ausente). As medidas foram feitas no LABOSAN (Laboratório de Saneamento da UFC). Os valores obtidos no Riacho dos Macacos superaram o limite de contagem do método substrato definido Colilert.

Poço	Concentrações (NMP/100 mL)			
	Período seco		Período chuvoso	
	20/06/02	05/11/02	15/01/03	10/04/03
PT 02	10	27	23	2
PT 03	11	A	3	6
PT 05	A	76	-	A
PT 06	A	A	A	4
PT 17	387	5	31	5
Riacho (PT 03)	> 2.419	> 2.419	> 2.419	> 2.419
Riacho (PT 05)	> 2.419	> 2.419	> 2.419	> 2.419

As concentrações de coliformes apresentam variações temporais diferenciadas, indicando uma dependência com a carga de poluentes existentes nas proximidades de cada poço. No final do

período chuvoso (10/04/03) verifica-se uma redução das concentrações indicando diluição. Neste mesmo período observa-se uma boa correlação ( $R = 0,912$ ) entre as concentrações de coliformes e a distância dos poços aos mananciais poluídos (Figura 9). Em outras coletas esta relação é menos óbvia



**Figura 9** - Concentração de coliformes *versus* distância dos poços aos mananciais poluídos.

## CONCLUSÃO

O tempo mínimo para o transporte advectivo de partículas do manancial poluído até o filtro dos poços, calculado pelo MODPATH, varia de aproximadamente 15 a 100 dias. Estes tempos são relativamente pequenos, considerando a meia vida dos coliformes em água subterrânea de aproximadamente 8 dias. Assim, é possível explicar a presença de coliformes em amostras coletadas nos poços, indicando que existe uma forte conexão do aquífero e as águas poluídas.

A velocidade de fluxo na área investigada é maior que a do fluxo natural, por causa do bombeamento dos poços, por isso, organismos patogênicos e coliformes podem ser transportados a distâncias bem maiores. Podendo esta área ser considerada de impacto potencial, devido à elevada taxa de bombeamento. Este fato pode ser observado no poço PT 06, cujo topo do filtro encontra-se a 88 m e suas águas chegaram a apresentar 4 NMP/ 100 mL de coliformes no período seco. Segundo Romero (1972), no fluxo natural os poluentes biológicos podem percorrer de 15 a 30 m, dependendo da litologia.

O Riacho dos Macacos e as lagoas constituem o elo principal na conexão entre a água superficial e a água subterrânea e necessitam de elevada atenção e proteção. Na atualidade eles são as principais entradas de contaminação das águas subterrâneas, funcionando como fontes persistentes e contínuas de poluição das águas explotadas para consumo humano.

Portanto, devem ser tomadas precauções para evitar o despejo de esgoto e lixo na área, para evitar a infiltração destes efluentes, que poderão no futuro, levar as comunidades que exploram o aquífero por poços mais rasos, à calamidade sanitária. Para isto devem ser instalados sistemas de tratamentos adequados para os efluentes domésticos e deposição de resíduos sólidos na área.

## **AGRADECIMENTO**

.Agradecemos a CAGECE (na pessoa de Expedito Galba Batista) o apoio logístico, a bolsista Maria da Conceição Beserra e ao professor Rodolfo José Sabiá da URCA, o apoio para realização das coletas para medidas bacteriológicas, à CAPES e à FUNCAP o apoio por meio de bolsas e financiamento de projeto

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Anderson, M.D., Wossner, N. 1992. **Applied ground water modeling**: simulation of flow and advective transport. San Diego – CA: Academic Press Inc. 381 p.
- Auer, M.T., Niehaus, S.L. 1993. Modeling fecal coliform bacteria-I. Field and laboratory determination of loss kinetics. **Water Resources**. 27: 4 693-701.
- Ceará. 1984. Companhia de Água e Esgoto do Ceará. Diretoria de Expansão. **Captação de Juazeiro do Norte**: estudo geofísico por eletrorresistividade. Fortaleza: PLANAT.
- 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.
- DNPM. 1996. **Projeto avaliação hidrogeológica da bacia sedimentar do Araripe**. Recife: DNPM. 103 p.
- Edberg, S. C., Leclerc, H., Robertson, J. 1997. Natural protection of spring and well drinking water against surface microbial contamination: Indicators and monitoring parameters for parasites. **Crit rev microbiol**. 23: 2 179-206.
- Köeppen, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México: FCE, 1948.
- Mendonça, L.A.R. 1996. **Modelagem matemática, química e isotópica de uma bateria de poços na cidade de Juazeiro do Norte – Ceará**. Fortaleza: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. 122 p.
- Mendonça, L.A.R. 2001. **Recursos hídricos da Chapada do Araripe**. Fortaleza: Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. 193p.

- Pollock, D.W. **User's guide for MODPATH/ MODPATH-PLOT, version 3:** a particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U. S. Geological Survey finite-difference ground water flow model. Virginia: 1994. Paginação irregular.
- Romero, J.C. 1972. **The movement of bacteria and viruses through porous media: water quality in a stressed environmental.** Minneapolis, Minnesota: Burges Publishing Company.