FILTRAÇÃO DE MEMBRANA E A SALINIZAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA: APLICAÇÃO A AQUÍFEROS DAS BACIAS DO RECÔNCAVO E TUCANO

OLIVAR A.L. DE LIMA*

ABSTRACT The Ilhas and São Sebastião aquifers in some regions of the Recôncavo and Tucano sedimentary basins contain water with high quantities of dissolved salts. Theoretical and experimental works have shown that shale layers may act as semi-permeable membranes that allow water to pass through them but restrict the passage of saline ions. This work presents a mathematical analysis of a hydrodynamic model idealized for those aquifer to evaluate the role of membrane filtration mechanisms as a factor influencing chemical changes during groundwater movement. The model consists of a sequence of three homogeneous and isotropic sandstone layers of uniform thicknesses intercalated with shale layers also considered homogeneous, isotropic and of uniform thicknesses. The sequence is bounded laterally on the dow-dip side by a impervious contour represented by a fault. Hydrostatic heads among the aquifers are assumed to increase linearly from the margins of each aquifer to the fault contour. The derived equations permit the analysis of salt concentrations in aquifers as a function of hydraulic and geometric parameters as well as of time. Despite the several restrictions, the theoretical concentrations estimated on the basis of this model show a good correspondence with the concentration estimated from electrical well logs for the São Sebastião aquifer. It is concluded that this mechanism may satisfactorily explain the observed water concentration in that aquifer.

INTRODUÇÃO Os grupos Ilhas e Massacarã nas bacias do Recôncavo e Tucano constituem uma seqüência de arenitos com intercalações de folhelhos e siltitos com mais de 2 000 m de espessura, de idade cretácea inferior. Eles contêm os aquíferos mais importantes das duas bacias em termos de reservas acumuladas e de produtividade dos poços (Ferreira, 1965; Leite, 1962; CERB, 1977). Não obstante, alguns problemas hidrológicos têm sido registrados em sua exploração, entre os quais se salienta a ocorrência de zonas de águas salinizadas não utilizáveis para consumo humano (CERB, 1975, 1977). As extensões superficiais dessas ocorrências não são conhecidas assim como o mecanismo de salinização das águas não está satisfatoriamente entendido.

Estudos recentes realizados por Lima e Ribeiro (1982) sobre o comportamento do aquífero São Sebastião (Grupo Massacarã) na área de captação do Centro Industrial de Aratu, Bahia (CIA-BA), utilizando perfilagens elétricas de poços, mostraram que esse aquífero constitui um sistema complexo contendo, nos primeiros 200 m a partir da superfície, pelo menos quatro níveis de arenitos permeáveis separados entre si por camadas contínuas de folhelhos. Esses corpos areníticos são normalmente lateralmente extensos, possuem pequeno ângulo de mergulho dos estratos e em muitos locais são truncados por falhas de gravidade. Com base em análises químicas de águas dos poços e em dados de perfis de potencial espontâneo, esses autores mostraram um aumento progressivo no teor de sais dissolvidos nas águas contidas em cada camada de arenito, no sentido do mergulho dos estratos. Foi observado também, em cada poço, um aumento da salinidade na mesma medida de sua profundidade (Lima e Ribeiro, 1982). Na região de Biritingas-Pataíba, na Bahia, Oliveira (1981) reporta uma situação geológico-estrutural semelhante a uma variação crescente do grau de salinização no sentido do mergulho das camadas.

Numerosos trabalhos têm sido publicados sobre a ocorrência e mecanismos de formação de corpos de águas salgadas (salmouras) em campos de petróleo de várias bacias

sedimentares do mundo (Billings *et al.*, 1969; Dingman e Angino, 1969; Leite e Ferreira, 1970). De Sitter (1947) sugeriu o mecanismo de filtração de membrana como um processo capaz de explicar a formação dessas salmouras em bacias isoladas. Bredehoeft *et al.* (1963) elaboraram um modelo de bacia fechada de forma cilíndrica na qual uma camada confinante situada entre formações mais permeáveis permitiria a passagem da água através dela mas, ao mesmo tempo, retardaria a passagem dos sais iônicos.

Neste trabalho, usando o procedimento analítico sugerido por Bredehoeft *et al.* (*op. cit.*), é elaborado um modelo hidrodinâmico idealizado para os aquíferos dos grupos Ilhas e São Sebastião, objetivando verificar a influência da filtração de membrana nas modificações da qualidade da água durante a circulação subterrânea.

O MECANISMO DE FILTRAÇÃO DE MEMBRANA

Considerações teóricas e estudos experimentais sobre a passagem de soluções eletrolíticas através de argilas compactadas e folhelhos demonstram que os mesmos atuam como membranas semipermeáveis que restringem a passagem de íons.

As propriedades de membrana dos folhelhos resultam de deficiências de cargas elétricas nas superfícies das partículas de argila. Esta deficiência é, em parte, devida à substituição de Si^{4+} por Al^{3+} e de Al^{3+} por Mg^{2+} em sítios do retículo cristalino (Grim, 1968). Em presença de soluções eletrolíticas, os cátions são atraídos para a superfície da partícula enquanto os ânions são repelidos. O mecanismo de difusão produz uma dupla camada entre a superfície da partícula e a solução normal, caracterizada por uma maior concentração de cátions e menor de ânions. Se as partículas se tornam adjacentes, como no caso dos folhelhos, essas duplas camadas se superpõem, o que diminui ainda mais a concentração de ânions na solução filtrada. Por isso moléculas neutras ou pouco ionizáveis passam através da membrana em resposta a gradientes hidráulicos, osmóticos ou de temperatura, en-

* Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica é Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil

quanto os ânions não passam ou são restringidos (Olsen, 1972). Além disso, para manter a neutralidade elétrica na solução externa à membrana, a filtração dos ânions determina, também, uma retenção complementar de cátions (Hanshaw e Coplen, 1973).

Desse modo, a água de precipitação que se infiltra nos aquíferos através de suas áreas de afloramento circula subterraneamente e é transferida verticalmente através de camadas semiconfinantes, deixando nos aquíferos os íons dissolvidos ou uma certa proporção deles a depender da eficiência das argilas presentes, o que pode produzir uma modificação apreciável na qualidade química das águas subterrâneas.

MODELO HIDRODINÂMICO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS

Visando testar a viabilidade do mecanismo de filtração de membrana nas alterações de qualidade da água subterrânea dos aquíferos Ilhas e São Sebastião nas bacias do Recôncavo e Tucano, foi idealizado um modelo teórico para simular esses sistemas aquíferos.

O modelo consiste em uma sequência de três camadas de arenito, homogêneas, isotrópicas e de espessuras uniformes, separadas entre si e limitadas na base por camadas de folhelho também homogêneas, isotrópicas e de espessuras uniformes (Fig. 1). Para simular muitas das condições geológicas encontradas no campo a sequência supõe-se limitada lateralmente por um contorno impermeável representado por uma falha. O sistema de coordenadas utilizado vem indicado na Figura.

Figura 1 — Modelo teórico do sistema aquífero analisado

Supõe-se que o fluxo dos arenitos é predominantemente horizontal e que existem diferenças de potencial piezométrico entre os vários aquíferos, e que o substrato do sistema é efetivamente impermeável. As diferenças de potencial que governam o fluxo ascensional da água, supõe-se, variam linearmente com a distância às áreas de afloramento. Embora existam variações de concentração iônica nas águas ao longo das camadas, a faixa dessa variação é admitida como pequena de modo que as variações de densidade e de viscosidade da água, como também efeitos osmóticos e de difusão por gradientes composicionais nos aquíferos, podem ser desprezadas. Supõe-se que as propriedades dos meios porosos e do fluido, exceto a concentração, não variam no tempo bem como que as condições de fluxo no sistema são isotérmicas.

O fluido inicial é tomado como água de chuva com uma concentração C_0 de solutos penetrando nos arenitos através de suas áreas de afloramentos. Dada a condição de ausência de efeitos de difusão, considera-se, ademais, que os íons em solução se movem com a mesma velocidade da água nos arenitos.

ANÁLISE MATEMÁTICA A análise que se segue é baseada na Lei de Darcy e no princípio da continuidade do fluxo, conforme propõem Bredehoeft *et al.* (1963). Serão deter-

minadas, separadamente, as equações que descrevem a variação da concentração de íons nos aquíferos (A1) e (A2) (Fig. 1), supondo-se que os folhelhos intercalados funcionem como membranas semipermeáveis com eficiência de 100% na retenção de partículas ionizadas.

Concentração no aquífero (A1) A Lei de Darcy estabelece que a quantidade de água por unidade de largura do aquífero, filtrada na camada semiconfinante (F1) por um elemento de área situada entre as distâncias x e $x + dx$ da origem, é dada por:

$$q_z(x) = \frac{k_1 H_1}{\ell_1 L_1} (L_1 - x) dx, \quad (1)$$

em que k_1 é a permeabilidade da camada semiconfinante (F1); H_1 é a diferença de potencial piezométrico entre os aquíferos (A1) e (A2) no limite impermeável; L_1 é a espessura da camada semiconfinante; e L_1 é a extensão do fluxo na camada semiconfinante (F1). A quantidade total de água transferida entre a origem e a distância x será:

$$Q = \frac{k_1 H_1}{\ell_1 L_1} \int_0^x (L_1 - x) dx = \frac{k_1 H_1}{\ell_1 L_1} (L_1 x - \frac{x^2}{2}). \quad (2)$$

Para manter a continuidade do fluxo no sistema, essa quantidade transferida através da camada semipermeável é substituída pelo fluxo interno no aquífero que se realiza através de sua espessura b_1 . A velocidade interna desse fluxo será:

$$V_x = \frac{Q}{b_1} = \frac{k_1 H_1}{\ell_1 L_1 b_1} (L_1 x - \frac{x^2}{2}). \quad (3)$$

A condição inicial no problema em questão supõe que no instante $t = 0$ toda a água tem uma concentração inicial C_0 . Além disso, à medida que ocorre a filtração pela camada semiconfinante, a água de concentração C_0 é suprida a partir da área de afloramento de (A1). Assim, transcorrido um tempo t , os íons inicialmente localizados a uma distância u da origem mover-se-ão para a distância v . O tempo t , dado em termos de u e v , será:

$$t = \int_v^u \frac{dx}{v_x} = \frac{b_1 \ell_1}{K_1 H_1} \int_v^u \frac{2L_1 dx}{(2L_1 x - x^2)}. \quad (4)$$

Fazendo a introdução do fator $\lambda = \frac{k_1 H_1}{b_1 \ell_1}$ e integrando a Eq. (4) obtém-se:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{u(2L_1 - v)}{v(2L_1 - u)}, \quad (5)$$

de modo que as distâncias u e v em termos de distância e tempo podem ser escritas como:

$$u = \frac{2L_1 v e^{\lambda t}}{2L_1 - v + v e^{\lambda t}} \quad (6)$$

$$v = \frac{2L_1 u}{u + (2L_1 - u) e^{\lambda t}} \quad (7)$$

Dessa forma, a água inicialmente localizada na margem do aquífero (distância $u = L_1$) transcorrido o tempo t ter-se-á movido para uma distância $v = d_1$ a partir da origem dada pela Eq. (7) na forma:

$$d_1 = \frac{2L_1}{1 + e^{\lambda t}} \quad \text{ou} \quad t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{2L_1 - d_1}{d_1} \right) \quad (8)$$

Diferenciando a Eq. (4) a respeito de v para valores fixos de t e usando a regra de Leibnitz de diferenciação sobre o sinal de integral, obtém-se:

$$\frac{du}{dv} = \frac{u(2L_1 - u)}{v(2L_1 - v)} \quad (9)$$

No instante $t = 0$, o número de íons localizados no intervalo u e $u + du$ por unidade de largura do aquífero era $C_0 b_1 du$. No tempo t , os íons estarão localizados no intervalo v e $v + dv$ num volume por unidade de extensão lateral do aquífero igual a $b_1 dv$. Portanto a concentração em v será dada por:

$$C_1(v) = C_0 \frac{du}{dv} \quad (10)$$

Substituindo (9) em (10), e levando em conta a Eq. (6), obtém-se para a distribuição da concentração a distâncias menores que d_1 , a relação:

$$C_1(v, t) = \frac{4C_0 L_1^2 e^{\lambda t}}{[2L_1 - v + v e^{\lambda t}]^2} \quad (11)$$

Para $v > d_1$, a concentração no tempo t deve ser expressa por (10), considerando em (9) $u = L_1$, conforme se verifica comparando (5) e (8), ou seja:

$$C_1(v) = \frac{C_0 L^2}{v(2L_1 - v)} \quad (12)$$

As Eqs. (11) e (12) descrevem a distribuição da concentração de íons no aquífero (A1) para valores fixados de tempo.

Concentração do aquífero (A2) Para analisar a concentração no aquífero (A2) deve-se considerar o problema de fluxo em duas partes. A primeira, limitada ao intervalo para o qual $x < L_2$, no qual o aquífero (A2) recebe água pura através de sua base proveniente do aquífero (A1) e perde água pura em seu topo através da camada semiconfinante (F2) (Fig. 1). No segundo intervalo, para o qual $L_2 < x < L_1$, o aquífero (A2) tem sua água diluída pela água pura proveniente do aquífero (A1).

Para ambos os casos, procedendo de maneira análoga à descrita na seção anterior, isto é, aplicando a Lei de Darcy para definir as transferências através das camadas semiconfinantes, em combinação com a condição de continuidade do fluxo nos dois aquíferos, e admitindo novamente que os íons se deslocam com a mesma velocidade da água, chega-se às seguintes equações para descrever a distribuição da concentração de íons no aquífero (A2) em tempos fixados:

para $v < L_2$

$$C_2(v, t) = \frac{C_0'(t) e^{\alpha t}}{[1 - \beta v + \beta v e^{\alpha t}]^2} \quad (13)$$

$$\text{para } v < d_2, \text{ em que } d_2 = \frac{L_2}{L_2 \beta + (1 - L_2 \beta) e^{\alpha t}}$$

e para $v > d_2$:

$$C_2(v) = \frac{C_0'(t) L_2 (1 - \beta L_2)}{v(1 - \beta v)} \quad (14)$$

para $L_2 < x < L_1$:

$$C_0'(t) = C_0 e^{\lambda_3 t} \quad (15)$$

Nas Eqs. (13), (14) e (15) têm-se que

$$\alpha = \frac{\lambda_2 L_2 - \lambda_1 L_1}{b_2}, \quad \beta = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2\alpha b_2},$$

$$\lambda_1 = \frac{k_1 H_1}{\lambda_1 L_1}, \quad \lambda_2 = \frac{k_2 H_2}{\lambda_2 L_2} e^{\lambda_3} = \frac{k_1 H_1 (L_1 - L_2)}{b_2},$$

nas quais k_1 e k_2 são as permeabilidades das camadas semiconfinantes (F1) e (F2); L_1 e L_2 são as extensões do fluxo nas camadas confinantes (F1) e (F2); b_2 é a espessura do aquífero (A2); e H_1 e H_2 são as diferenças de potencial piezométrico entre os aquíferos (A1) e (A2) e (A2) e (A3) no limite impermeável, respectivamente. A Eq. (15) mostra que a concentração da água no intervalo $L_2 < x < L_1$ diminui progressivamente com o tempo e, para valores fixados de tempo, é independente da distância v .

RESULTADOS NUMÉRICOS E IMPLICAÇÕES

As Eqs. (11), (12), (13) e (14) foram programadas para uso em uma calculadora de mesa HP modelo 9100B.

A Fig. 2 ilustra a distribuição de concentração aquífero (A1) para vários valores de tempo. Para o modelo, tomou-se $L_1 = 10$ km e $\lambda = 5 \times 10^{-3}$ /dia. Verifica-se da apreciação de família de curvas apresentadas que a concentração aumenta com o tempo até que o mesmo se torne

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{2L_1 - d_1}{d_1} \right) \quad (16)$$

e a partir daí se torna constante. O tempo para a estabilização da curva é infinito no contorno da falha ($v = 0$) e zero no limite de afloramento do aquífero.

A Fig. 3 ilustra famílias de curvas de concentração no aquífero (A2) para vários tempos. Para este modelo, adotou-se $L_2 = 8$ km e $\lambda_2 = 10\lambda_1$ de tal modo que a concentração no aquífero (A2) também cresce à medida que se aproxima da falha. O comportamento assintótico das curvas é similar ao da Fig. 2.

As Figs. 2 e 3 mostram também que para tempos de circulação muito grandes a concentração de sais nas proximidades das falhas podem atingir valores extremamente elevados, de modo que este fato deve ser levado em conta nos trabalhos de locação de poços exploratórios nos sistemas aquíferos onde esse fenômeno é operante.

Figura 2 — Distribuição da concentração no aquífero (A1) $L_1 = 10$ km $\lambda_1 = 5 \times 10^{-3}$ /dia

Figura 3 — Distribuição da concentração no aquífero (A2) $L_1 = 10 \text{ km}$, $L_2 = 8 \text{ km}$ $\lambda_2 = 10\lambda_1$

Verifica-se, ainda, da análise dessas figuras que, se os aquíferos inferiores possuem potencial piezométrico mais elevado que os imediatamente acima, ou seja, se os gradientes hidráulicos são positivos, para valores fixados de v os níveis aquíferos mais profundos são os de maior concentração de sais. O inverso dessa situação ocorre para o caso de gradientes hidráulicos negativos.

A Fig. 4 é uma seção geológica esquemática transversal do aquífero São Sebastião na área de captação do Centro Industrial de Aratu. Não se dispõem de análises químicas específicas da água de cada nível aquífero mas, pelo uso do perfil de potencial espontâneo em poços da área, foi possível determinar valores de resistividade da água contida em cada camada (Lima e Ribeiro, 1982). Como a resistividade é uma função da salinidade, mostra-se ainda na Fig. 4 o perfil de distribuição da condutividade elétrica contra a distância para a água contida no aquífero PT-2. Embora os dados apresentados na Fig. 4 correspondam a apenas cerca de um terço da extensão do fluxo na camada confinante de PT-2, já que a falha limitante do fluxo se situa a 2 200 m do poço CIA-35, é possível notar a similaridade dessa curva com a das curvas teóricas das Figs. 2 e 3, salientando-se o aumento contínuo da salinidade com a distância à área de afloramento de PT-2. Infelizmente não se conhece a diferença de potencial piezométrico entre esse aquífero e os vizinhos, de modo que não é possível usar as equações desenvolvidas neste trabalho para estimativas das permeabilidades das camadas semiconfinantes.

Figura 4 — Perfil geológico do sistema aquífero da Formação São Sebastião na área de captação do Centro Industrial de Aratu, Bahia, e curva de variação da resistividade com a distância para o nível PT-2

CONCLUSÃO Apesar de uma série de limitações impostas ao modelo teórico do sistema aquífero idealizado, de modo a tornar mais fácil a análise do problema de salinização da água subterrânea, os resultados obtidos mostram que o mecanismo de filtração de membrana pode ser um fator importante no processo de salinização da água sob condições geológicas especiais (presença de um contorno impermeável representado por uma falha), que são comuns nos aquíferos dos grupos Ilhas e São Sebastião. Os fatores controladores mais importantes no processo são a existência das diferenças de potencial piezométrico entre os diversos níveis aquíferos e a efetiva selagem ao longo de falhas.

As soluções desenvolvidas no presente trabalho podem ser usadas de modo aproximado para descrever a distribuição de concentração em situações reais e, havendo suficientes dados disponíveis, permitem fazer estimativas dos valores de permeabilidade das camadas semiconfinantes. Esses resultados servem também como um critério de controle na locação de poços nessas regiões.

Agradecimentos O autor agradece ao Professor Umberto R. Costa pelas valiosas sugestões apresentadas à primeira versão deste trabalho e ao CNPq pelo suporte por intermédio da Bolsa de Pesquisa. Este trabalho foi financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica da UFBA.

BIBLIOGRAFIA

- BILLINGS, G.K., HITCHON, B. and SWAW, D.R. — 1979 — Geochemistry and origin of formation waters in the Western Canada Sedimentary Basin 2. Alkali Metals. *Chem. Geol.* 4:211-223.
- BREDEHOEFT, J.D., BLYTH, C.R., WHITE, W.A. and MAXEY, G.B. — 1963 — Possible mechanism for concentration of brines in subsurface formations. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.* 47(2):257-269.
- CERB — 1975 — Cadastro de Poços Tubulares do Estado da Bahia. Companhia de Engenharia Rural da Bahia, Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Salvador.
- CERB — 1977 — Cadastro de Poços Tubulares do Estado da Bahia. Companhia de Engenharia Rural da Bahia, Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Salvador.
- DINGMAN, J.D. and ANGINO, E.E. — 1969 — Chemical composition of selected Kansas brines as an aid to interpreting change in water chemistry with depth. *Chem. Geol.* 4:325-339.
- DE SITTER, L.U. — 1947 — Diagenesis of oil field brines. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.* 31:2030-2040.
- FERREIRA, J.C. — 1965 — Hidrogeologia das Bacias Sedimentares de Tucano e Jatobá. *Bol. Tec. Petrobrás* 8:57-75.
- GRIM, R.E. — 1968 — *Clay Mineralogy*. 2nd. ed. McGraw-Hill, New York.
- HANSHAW, B.B. and COPLIN, T.B. — 1973 — Ultrafiltration by a compacted clay membrane — II. Sodium ion exclusion at various ionic strengths. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 37:2311-2327.

- LEITE, D.C. — 1962 — Possibilidade de Água Subterrânea na Bacia do Recôncavo Bahiano. *Petrobrás, Rel. Int.* 525, Salvador.
- LEITE, D.C. e FERREIRA, J.C. — 1970 — Discordância na Bacia do Recôncavo, Bahia. *Anais do XXIV Cong. Bras. de Geol.* 173-189.
- LIMA, O.A.L. e RIBEIRO, A.C. — 1982 — Caracterização Hidrogeológica do Aquífero São Sebastião na área de captação do CIA-Bahia, usando perfisagens elétricas de poços. *Rev. Bras. Geof.* (no prelo).
- OLIVEIRA, I.B. — 1981 — Estudos geofísicos sobre a extensão e a origem da salinização das águas dos aquíferos da região de Biritinga/Patãiba, Bahia. Projeto de Tese de Mestrado em Geofísica, PPPG/UFBA. Salvador.
- OLSEN, H.W. — 1972 — Liquid movement through kaolinite under hydraulic, electric and osmotic gradients. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.* 56:2022-2028.

MANUSCRITO

Recebido em 12 de agosto de 1982

Revisão aceita em 14 de outubro de 1982