

SIMULAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS NO AQUÍFERO BARREIRAS NA REGIÃO DA LAGOA DO BONFIM POR ELEMENTOS ANALÍTICOS

José Anderson do N. Batista¹, Edson Wendland² e Harry Edmar Schulz³

Recebido em 22 novembro, 2006 / Aceito em 21 junho, 2007
Received on November 22, 2006 / Accepted on June 21, 2007

ABSTRACT. In Rio Grande do Norte State, Barreiras aquifer is the most important groundwater reservoir. In local water resources planning it is estimated for year 2020 a rise of 35% in withdraws from that aquifer. In this sense, groundwater flow in Bonfim lake area has been hardly studied in order to evaluate how groundwater pumping interacts to surface water. The main objective in this work is to contribute to groundwater flow knowledge in the area and secondly to demonstrate the Analytic Element Method (AEM) functionality in strait (or elongated) aquifers by coupling the Method of Images. The proposed method allows the simulation to be extended infinitely between two straight lines. However, the results nearest regional boundaries become insensitive to the boundary shape. Thus, the simulation produced a recharge rate estimate about 0.9 mm/day. The groundwater pumping moves the Bonfim lake water level approximately to 5.0 m below.

Keywords: Bonfim Lake, Analytic Elements, Method of Images.

RESUMO. No estado do Rio Grande do Norte, o aquífero Barreiras constitui-se no principal manancial subterrâneo, sendo estimado para o ano de 2020 um crescimento de 35% sobre a demanda conhecida do aquífero. Nesse contexto, o escoamento subterrâneo na região da lagoa do Bonfim tem sido amplamente estudado em função da implantação e ampliação da infra-estrutura hídrica na região. O objetivo principal deste trabalho é contribuir para o conhecimento do escoamento no aquífero Barreiras e demonstrar a funcionalidade do Método de Elementos Analíticos (AEM) em aquíferos estreitos (ou alongados) mediante o uso do Método de Imagens. Essa metodologia faz com que o aquífero seja representado entre duas linhas retas infinitas. Por outro lado, a análise do escoamento torna-se grosseira em regiões próximas às fronteiras do aquífero. A simulação foi capaz de produzir uma estimativa para a taxa de recarga na região igual a 0,9 mm/dia. O efeito do bombeamento sobre a lagoa do Bonfim reduz cerca de 5,0 m a cota do espelho de água.

Palavras-chave: Lagoa do Bonfim, Elementos Analíticos, Método de Imagens.

¹Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS-EESC-USP), Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro – 13566-590 São Carlos, SP, Brasil. Tel.: (16) 3373-8270; Fax (16) 3373-9550 – E-mail: joseandersonbatista@gmail.com

²Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS-EESC-USP), Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro – 13566-590 São Carlos, SP, Brasil. Tel.: (16) 3373-9541; Fax (16) 3373-9550 – E-mail: ew@sc.usp.br

³Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS-EESC-USP), Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro – 13566-590 São Carlos, SP, Brasil. Tel.: (16) 3373-9555; Fax (16) 3373-9550 – E-mail: heschulz@sc.usp.br

INTRODUÇÃO

O aquífero Barreiras constitui-se no principal manancial subterrâneo do estado do Rio Grande do Norte, fornecendo atualmente cerca de 12.803,60 m³/h. Na região da lagoa do Bonfim o escoamento subterrâneo tem sido amplamente estudado em função da implantação e ampliação da infra-estrutura hídrica na região. Desde 1997, grandes programas de abastecimento têm sido realizados no estado. Até o ano de 2020, é estimado ainda um crescimento de 4.550,54 m³/h, ou seja, de 35%, sobre a demanda conhecida do aquífero nesse estado (SERHID, 1998). O sistema adutor Trairi/Potengi, por exemplo, integra-se a estes programas, para atender até 2016 uma população de 226.336 habitantes e uma demanda pontual de 1.628,35 m³/h. A captação desse sistema é feita na região da lagoa do Bonfim situada no litoral leste do RN sobre o aquífero Barreiras (Fig. 1), por intermédio de poços tubulares e bombeamento diretamente da lagoa.

Melo & Feitosa (1998) apontaram condições hidrogeológicas favoráveis à instalação da captação do sistema à montante (à oeste) da lagoa. No entanto, o rebaixamento do nível de água apresentado na lagoa do Bonfim, após o início da operação do sistema deu origem a novos estudos em busca de opções de perfuração visando a redução do impacto acarretado à lagoa. Assim, os trabalhos posteriores a Melo & Feitosa (1998) têm abordado o escoamento subterrâneo na região da lagoa do Bonfim utilizando-se tanto de métodos de campo (Pereira et al., 2003) como métodos numéricos (Manuel Filho & Castro, 2002) e de balanço hídrico (Pereira et al., 2002; Batista, 2001). Esses trabalhos tiveram o objetivo comum de descrever o comportamento natural do escoamento e avaliar os impactos da captação de água na região.

A simulação realizada neste trabalho utiliza o Método de Elementos Analíticos (denominado também pela sigla AEM), uma metodologia analítica eficiente para problemas práticos de engenharia de águas subterrâneas que, embora, ainda, pouco difundida, tem sido estudada desde os anos setenta. O AEM foi desenvolvido, originalmente, por ocasião de um estudo de engenharia hídrica nos anos setenta (Strack & Haitjema, 1981a, 1981b), o AEM teve sua formulação e implementação computacional publicadas somente no início dos anos noventa (Strack, 1989; Haitjema, 1995). A partir de então, a produção científica no assunto passou ser notória nos principais periódicos da área. Para citar alguns dos principais artigos, tem-se Zaardnoordijk & Strack (1993); Fitts (1997); Strack (1999); Strack et al. (1999); Janović & Barnes (1999a, 1999b); Luther & Haitjema (2000); Bak-

ker & Strack (2003); Furman & Neuman (2003); Bakker (2004), entre outros. Diversas aplicações também têm demonstrado a utilização do método em problemas reais no Brasil (e.g. Gomes & Castro, 2002). Por ser um método aplicável a domínios abertos, o método torna-se especialmente adequado em problemas de escala regional. Os leitores interessados poderão encontrar apresentações detalhadas de casos de aplicações do método em diversas páginas da Internet (Streitz et al., 1999; Kramer et al., 2003, entre outros).

Com o objetivo de contribuir para o conhecimento do escoamento no aquífero Barreiras e demonstrar a funcionalidade do AEM em aquíferos alongados, este trabalho apresenta uma aplicação do método acoplado ao Método de Imagens na região da lagoa do Bonfim. A seguir são apresentadas: uma revisão de estudos realizados na região, uma breve apresentação do AEM e do Método de Imagens, a modelagem do escoamento subterrâneo na área de estudo e a discussão dos resultados obtidos do modelo para a interação entre as águas subterrâneas e superficiais na região.

TRABALHOS ANTERIORES

A construção da adutora Trairi/Potengi propiciou a contratação de vários estudos de consultoria (e.g. Melo & Feitosa, 1998) e promoveu a construção de uma densa rede de monitoramento piezométrico e hidrológico, que tem gerado uma extensiva massa de dados. Com o objetivo de caracterizar o comportamento hidráulico e hidrológico do aquífero do sistema lacustre Bonfim, Pereira (2001) realizou um conciso levantamento bibliográfico a respeito da hidrogeologia da região e identificou importantes conexões hidráulicas e parâmetros hidrogeológicos. Segundo Pereira (2001) estas lagoas teriam sido formadas em uma zona de recarga do aquífero. A recarga em aquíferos do litoral nordestino é ainda uma incógnita, embora alguns estudos de balanço hídrico tenham sido realizados em microbacias da região (Pereira, 2001; Melo & Feitosa, 1998).

Segundo Pereira et al. (2003), o escoamento em torno da lagoa do Bonfim é ainda um tema em aberto. Entende-se que sua alimentação seja preponderantemente subterrânea e atmosférica, uma vez que não existem, em torno da lagoa, sinais de processo erosivo, característicos de escoamento superficial. Dessa forma, os diversos trabalhos já realizados não são unânimes a respeito do balanço hídrico anual médio na lagoa, que é decisivo para a avaliação de impactos da operação do sistema adutor Trairi/Potengi sobre a mesma.

Manuel Filho & Castro (2002) realizaram uma avaliação

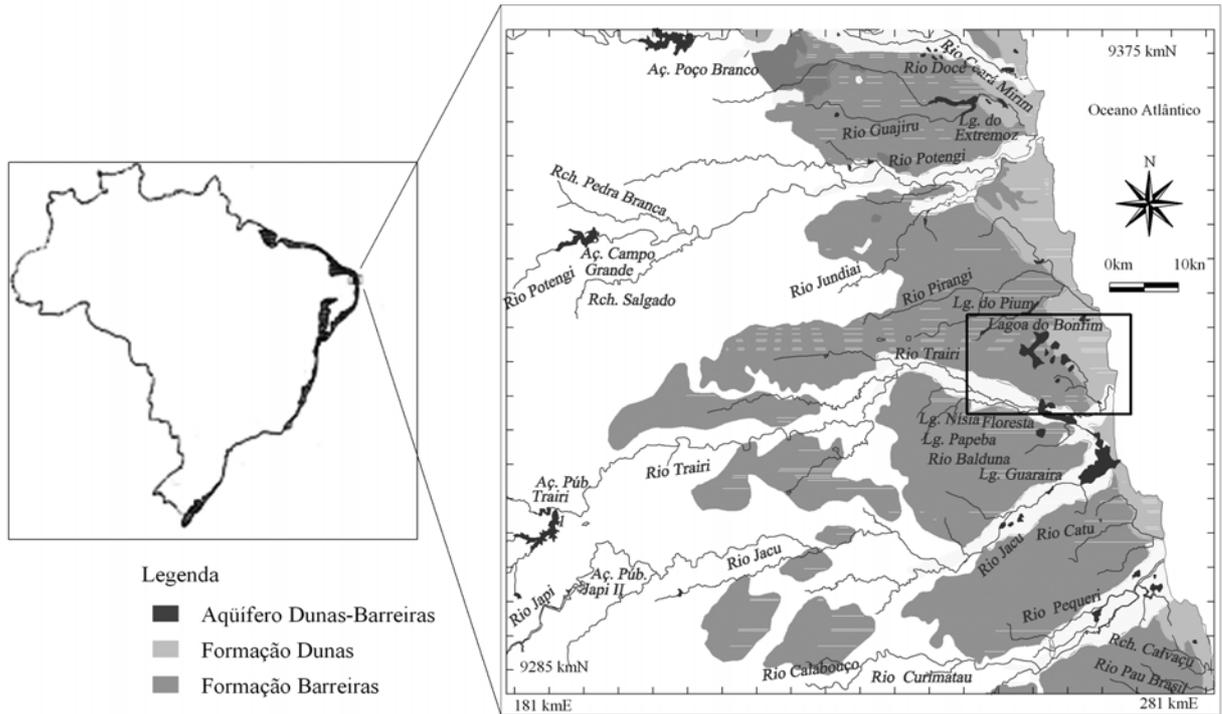


Figura 1 – Localização da área de estudo.

numérica das condições de exploração do aquífero na região considerando-se a atual configuração de poços instalados na área. Na Figura 2 é apresentado o resultado de uma simulação obtida do método de diferenças finitas por Manuel Filho & Castro (2002). Segundo os autores, a lagoa do Bonfim seria influente, ou seja, a lagoa infiltraria água para o sistema aquífero. Dessa forma, as condições de equilíbrio estacionário da lagoa foram obtidas impondo-se sua elevação a uma cota piezométrica de 39,0 m em relação ao nível do mar.

A área simulada foi compreendida entre os seguintes contornos hidrogeológicos: afloramento do cristalino a oeste ao longo do lineamento pelo Sinal Macaíba, simulado como impermeável; o oceano Atlântico, a leste, simulado como limite de carga conhecida; o riacho Pium ao norte e o rio Trairi ao sul, ambos simulados como contornos do terceiro tipo (com estimativa da condutância). Os riachos foram considerados também como contornos do terceiro tipo. As lagoas foram simuladas como “limites de carga geral”, nível de água conhecido, portanto, condição do primeiro tipo. Por fim, os sete poços tubulares em operação foram representados com penetração total. A condutividade hidráulica (K) foi definida igual a 10,0 m/d, considerando o domínio completamente homogêneo e isotrópico. A recarga foi utilizada segundo estimado em (Melo & Feitosa, 1998) igual a 0,66 mm/dia.

METODOLOGIA

Conceitos em AEM

O Método de Elementos Analíticos (AEM) foi concebido como uma alternativa para problemas de escoamento em aquíferos de escalas regionais sem a perda de detalhes locais (Strack & Haitejema, 1981a). O método é baseado no uso de soluções (analíticas) aproximadas para elementos hidrogeológicos que se constituem nas “peças” do modelo do aquífero, trazendo mais precisão no cálculo e economia computacional.

Diferentemente, dos métodos de aproximação por discretização do domínio, o Método de Elementos Analíticos utiliza soluções analíticas de “problemas elementares” inter-relacionadas pela sobreposição de efeitos em programas computacionais. Dessa forma, as soluções elementares são funções analíticas obtidas previamente em trabalhos de pesquisa de maneira a satisfazerem equações diferenciais de Águas Subterrâneas sob diferentes condições de contornos. Essas soluções prévias são geralmente obtidas para efeitos isolados caracterizados em um segmento de reta, formulando-se, dessa forma, o que se chama de *elemento analítico*. A sobreposição desses elementos analíticos, computacionalmente, tem se demonstrado eficiente na modelagem de problemas bidimensionais, permitindo variação espacial

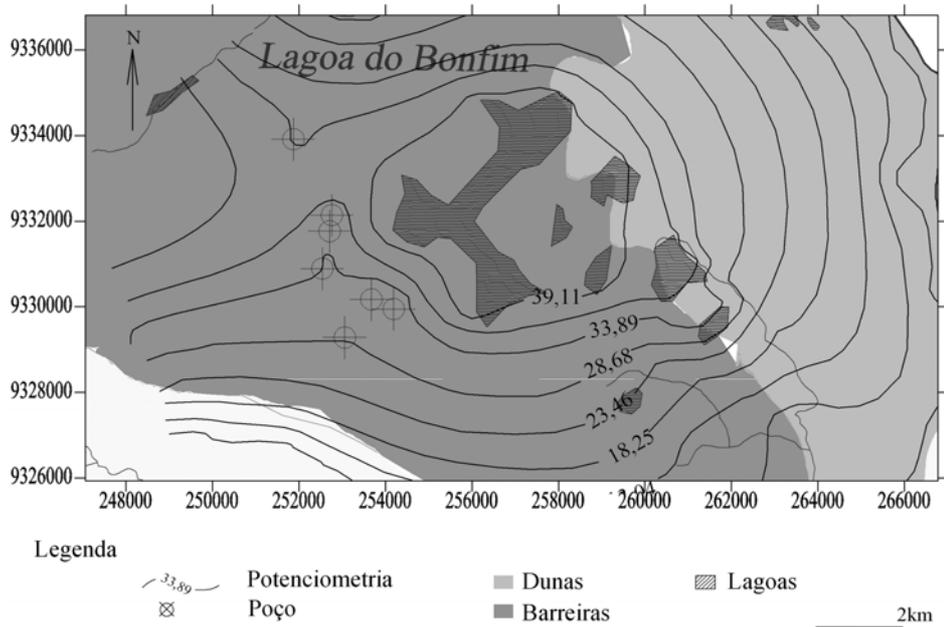


Figura 2 – Simulação de diferenças finitas da potenciometria da região da lagoa do Bonfim (Modificado de Manuel Filho & Castro, 2002).

de parâmetros e a representação de qualquer geometria, além da representação de aquíferos infinitos. Na Figura 3, são apresentadas diversas figuras geométricas que ilustram a utilização de elementos analíticos em um modelo idealizado. Nesse modelo são consideradas as presenças de diversos rios e seus aluviões, além de um pequeno perímetro urbano assinalado por linhas pontilhadas e um poço, ilustrado por um pequeno círculo.

Na construção de um modelo AEM, os elementos analíticos são adotados a critério do modelista, escolhendo-se o tipo de elemento (solução elementar) que melhor satisfaz cada condição de contorno encontrada no domínio (aquífero). Existe uma significativa diversidade de soluções analíticas desenvolvidas com base no conceito de elementos analíticos. Elas representam efeitos como o bombeamento em poços, a presença de linhas fontes/sumidouros (*linesinks*), fontes/sumidouros que ocorrem em áreas fechadas (*areasinks*), fronteiras entre regiões hidrogeologicamente distintas (*linedoublets*) etc. Elementos *linedoublets* são utilizados para a representação de fronteiras encontradas entre materiais de diferentes condutividades. A representação de contornos de corpos de água e outras formas de interação do aquífero com a atmosfera pode ser obtida com os elementos *linesink*. A aplicação de *areasinks* pode ser útil tanto para a representação de áreas de diferentes valores de recarga/descarga, como para a representação de áreas semi-impermeáveis entre aquíferos.

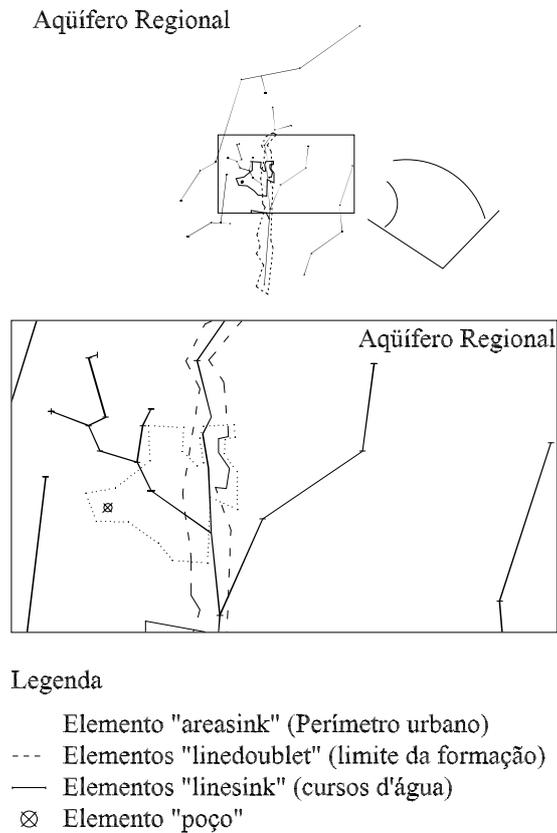


Figura 3 – Esboço da disposição de elementos analíticos em um modelo idealizado (Fonte: Haitjema, 1995).

Como já mencionado, um modelo AEM de escoamento consiste da sobreposição de efeitos formulados analiticamente. Nas Figuras 4, 5, 6 são ilustrados exemplos de interferências devido à presença de cada tipo de elemento mencionado acima (respectivamente, *linedoublets*, *linesinks* e *areasinks*). Diversos programas de computador de domínio público têm sido desenvolvidos para viabilizar a aplicação do AEM. Esses programas se baseiam em três passos: 1) obter do modelista a devida correspondência entre elementos e as estruturas de interferências caracterizadas no aquífero; 2) calcular os esforços necessários para atender as condições de contorno especificadas; e 3) fornecer a visualização das variáveis simuladas. As simulações e exemplos apresentados neste artigo foram obtidos a partir de uma ferramenta desenvolvida especificamente para este trabalho, a partir do programa TimSL (Bakker et al., 2006). A sobreposição desses efeitos fornece a representação desejada para o escoamento especificado.

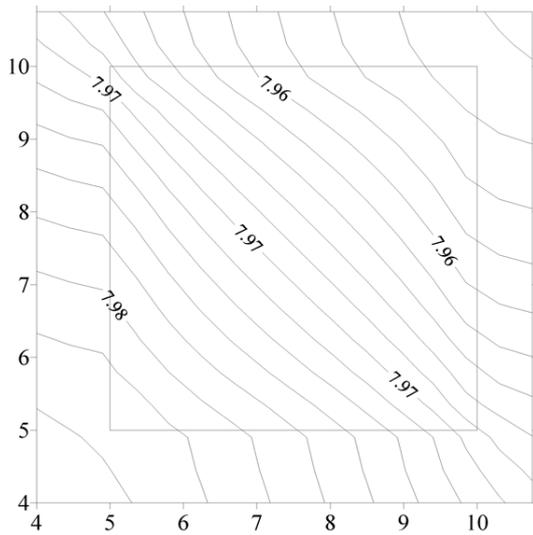


Figura 4 – Distribuição potenciométrica produzida por um campo de escoamento uniforme através de uma região retangular arbitrária de menor condutividade hidráulica que o exterior.

Aplicação do Método de Imagens a Elementos Analíticos

O modelo do escoamento na região é elaborado utilizando-se os elementos do AEM combinado com o Método de Imagens. Considerando que os elementos analíticos descrevem particularmente os fenômenos de escoamento que ocorrem no interior, a imposição de fronteiras regionais requer a aplicação do clássico Método de Imagens (e.g. Bear, 1972; Bakker & Anderson, 2004). O método possibilita a representação de condições de contornos ao longo de linhas retas infinitas. Assim, a aplicação do método em modelos de elementos analíticos consiste em se replicar ele-

mentos presentes no interior do aquífero (como poços etc.) em torno das fronteiras do aquífero.

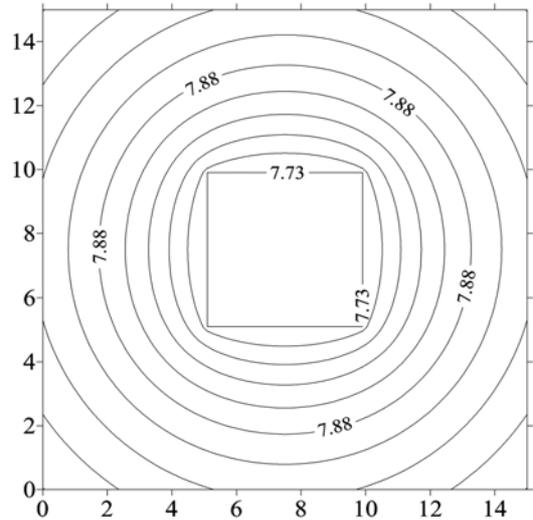


Figura 5 – Distribuição potenciométrica produzida por um lago efluente em um campo de escoamento uniforme.

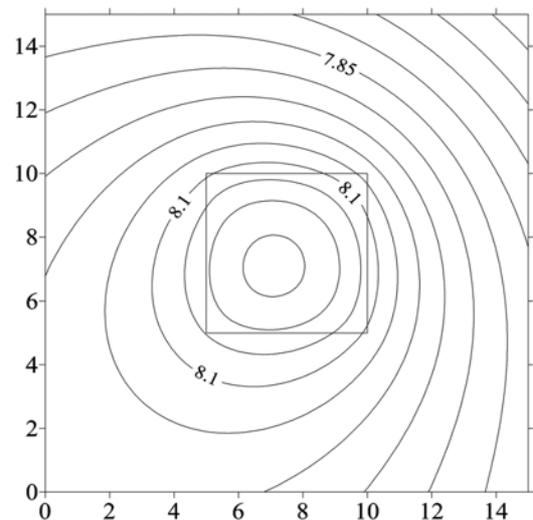


Figura 6 – Distribuição potenciométrica produzida por uma taxa de recarga constante dentro de uma área retangular.

O Método de Imagens tem sido utilizado largamente para a avaliação da potencialidade de poços perfurados em locais próximos a uma fronteira qualquer (Bear, 1972). Recentemente, trabalhos têm sido dedicados à utilização do método a fronteiras semi-impermeáveis (Bakker & Anderson, 2004). A representação de condições de contorno mediante o uso do Método de Imagens consiste em obter a simetria do escoamento em relação aos contornos desejados. Assim, um poço próximo a uma linha reta impermeável é representado espelhando-se o poço em relação ao contorno. Diferentemente, se o poço é perfurado em

um local próximo a uma fronteira onde se impõe que o potencial seja constante, sua representação é obtida com o espelhamento da sua posição e o oposto de sua vazão de bombeamento. A aplicação do método a elementos analíticos é feita de forma semelhante à do poço, porém seus esforços devem ser espelhados vetorialmente. A sistematização e a aplicabilidade do Método de Imagens em modelos de elementos analíticos (AEM) é apresentada no trabalho de Batista et al. (2005). O leitor interessado na aplicação do Método de Imagens em problemas de hidrogeologia encontrará descrições detalhadas nos trabalhos de Bear (1972) e Bakker & Anderson (2004).

Modelagem do escoamento em escala regional na área de estudo

O aquífero Barreiras estende-se por uma longa faixa com largura de aproximadamente 30 km ao longo da costa de vários estados do Nordeste brasileiro. Os contornos globais do aquífero, em toda sua extensão, são dados pela fronteira com a linha de costa e com o afloramento do cristalino na direção do interior continental. Observando-se o fato de que a geometria da costa e do afloramento segue uma tendência linear durante um trecho bastante longo, essas fronteiras são aqui aproximadas por linhas retas.

Sendo essa uma abordagem global do aquífero, as propriedades do meio (condutividade hidráulica K e cota altimétrica da base do aquífero b) e a taxa de recarga (N) são representadas uniformemente distribuídas. A expressão para esse escoamento é dada pela fórmula do escoamento unidimensional entre dois drenos apresentada na Eq. (1):

$$\Phi = -\frac{N}{2} X^2 + NLX + \Phi_0 \quad (1)$$

onde L é a distância $[L]$ entre a fronteira impermeável e a fronteira permeável; Φ_0 é o escoamento potencial $[L^3 T^{-1}]$ observado na fronteira permeável expresso por $\Phi_0 = K/(2) h_0^2$, onde h_0 é a carga piezométrica; e X é a posição $[L]$ a partir da fronteira permeável.

A expressão é utilizada no plano horizontal na forma da Eq. (2), onde ξ e η são as componentes da distância $[L]$ do ponto de referência até a posição considerada no sistema de coordenadas e α o ângulo entre as fronteiras e o eixo sul-norte.

$$\Phi = -\frac{N}{2} (\xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha)^2 + NL (\xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha) + \Phi_0 \quad (2)$$

Esquemáticamente o perfil do escoamento produzido pela infiltração da recarga, expressa pela Eq. (1), é ilustrada na Figura 7. Pode-se observar que, nesta etapa da construção do

modelo, a abordagem global do aquífero pode ser feita de uma maneira bastante simplificada, onde os efeitos encontrados na escala local não estão ainda representados.

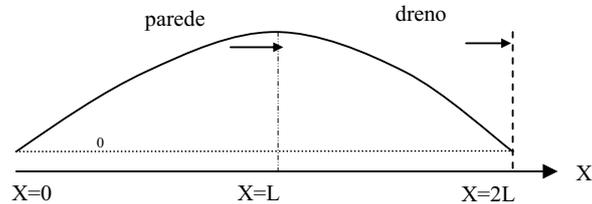


Figura 7 – Esboço ilustrativo para a Eq. (1).

O efeito da recarga no escoamento é representado unidimensionalmente, portanto, ao longo de um trecho localizado entre dois pontos fronteirizos. Esses pontos são representados no plano por duas retas paralelas. Os parâmetros utilizados na Eq. 1 foram adotados conforme valores encontrados nos trabalhos de Pereira (2001) e Melo & Feitosa (1998): $K = 12,0$ m/dia, $b \approx -20$ m e $N = 0,6$ mm/dia. A taxa de recarga, no entanto, foi utilizada para a calibração do modelo em função do nível de água da lagoa do Bonfim. A geração de gradientes em escala local, por sua vez, é obtida a partir da utilização dos elementos analíticos sujeita ao Método de Imagens, conforme apresentado na seção seguinte.

Modelagem do escoamento em escala local na área de estudo

Os dados do sistema hidrogeológico foram empregados de acordo com uma avaliação, ainda que subjetiva, dos seus níveis de incerteza. Foram utilizados preferencialmente dados hidrometeorológicos como medidas de precipitação e estimativas de evaporação. Em seguida, os valores de parâmetros hidrogeológicos encontrados na literatura (Pereira, 2001 e Melo & Feitosa, 1998), como condutividade hidráulica e taxa de recarga cuja determinação possui menor precisão que os primeiros, foram utilizados apenas como referência para os dados da simulação.

Assim, diferentemente do trabalho de Manuel Filho & Castro (2002), o equilíbrio estacionário da lagoa do Bonfim foi obtido mediante a imposição apenas do balanço entre precipitação e evaporação do espelho de água em vez da sua carga piezométrica. Utilizando-se valores medidos entre nov/98 e mar/02 o balanço hídrico do espelho da lagoa do Bonfim seria igual a $8.352,7$ m³/dia. A esse valor foi somado um volume médio de captação do espelho obtido a partir de valores monitorados entre jul/00 e mar/02 ($\bar{Q} = 9.367,2$ m³/dia). Os volumes captados dos poços estão reunidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Coordenadas UTM (25ª Zona) e vazões dos poços da adutora.

Poços	UTM E (m)	UTM N (m)	Vazões (m ³ /mês)
1	254184,2	9329942,4	48200,0
2	253673,7	9330168,1	44700,0
3	252536,4	9330893,8	39600,0
4	252707,2	9331760,6	23500,0
5	252757,14	9332137,4	59700,0
6	251867,75	9333917,16	25000,0
7	253057,4	9329284,2	42000,0

A formação Dunas e a formação Barreiras compõem um único aquífero chamado Dunas-Barreiras ou, simplesmente, Barreiras. A formação Dunas é encontrada junto à linha de costa sobre a formação Barreiras apresentando uma condutividade hidráulica $K = 4,1$ m/dia (Melo & Feitosa, 1998). As fronteiras entre a formação Barreiras e a formação Dunas são representados por elementos *linedoublets* em concordância com a aproximação global feita para o aquífero Barreiras, conforme ilustrado na Figura 8. Valores de recarga e de profundidade da base foram adotados iguais aos da formação Barreiras. A distribuição dos rios e riachos estende-se, em relação à lagoa do Bonfim, por uma distância de aproximadamente 25 km, nas duas direções globais do aquífero. A condição de contorno utilizada é do primeiro tipo, ou seja, cargas hidráulicas conhecidas, aproximadas pela topografia das margens dos rios. Foram utilizados os elementos *line-sinks*.

RESULTADOS

Dois cenários são considerados, visando uma avaliação da influência da captação mista do sistema adutor Trairi/Potengi na região da lagoa do Bonfim sobre o espelho de água da mesma. No primeiro cenário a condição natural do sistema foi simulada na tentativa de encontrar o valor da taxa de recarga necessário para levar o nível de água da lagoa do Bonfim a cotas observadas antes da implantação do projeto hídrico. No segundo cenário são introduzidos os bombeamentos do espelho de água da lagoa e dos poços, conforme descritos na seção anterior. A distribuição obtida em ambos os cenários é ilustrada na Figura 9.

O valor da taxa de recarga regional foi obtido em 0,9 mm/dia de forma que o nível da lagoa do Bonfim foi ajustado para o valor de 41,65 m (estimativa do nível médio natural da lagoa segundo Batista, 2001). O valor encontrado é cerca de 30% superior ao utilizado no trabalho de Pereira (2001). Entretanto, essa discrepância é atribuída, em primeira análise, às diferentes naturezas dos métodos utilizados em campo e em simulação.

Considerando-se que o modelo utiliza um único valor de recarga constante no espaço e no tempo, o modelo não consegue capturar as variações temporais do parâmetro. Assim, o resultado de campo retrata uma situação instantânea, enquanto o modelo busca simular uma condição média. Em segundo lugar, embora o uso de elementos analíticos permita que a variação espacial da taxa pudesse seja modelada, a escassez dos dados de referência limita a potencialidade do modelo e enfraquece a comparação dos resultados.

De acordo com o cenário onde se apresenta o bombeamento conjunto dos poços e da lagoa, a simulação aponta para a redução do nível estacionário do espelho de água em aproximadamente 5,0 m. Isso significa que o padrão de oscilação do nível de água ocorreria em torno da cota 36,84 m. A influência do bombeamento no comportamento da lagoa do Bonfim pode ser discutida sob dois aspectos: da redução da área de contribuição e da redução do nível de água da lagoa. A partir da Figura 9, pode-se perceber a modificação do escoamento na região oeste da lagoa do Bonfim. Observando-se a curvatura das isocotas percebe-se que o escoamento proveniente de oeste seria interceptado pelos poços. Dessa forma, a lagoa do Bonfim passaria a ser alimentada preponderantemente a partir de leste, onde as elevações potenciométricas são superiores. Por outro lado, a potenciométrica obtida do cenário de bombeamento exibe cotas reduzidas na borda da lagoa do Bonfim. Demonstrando-se a interferência do bombeamento dos poços no nível de água da lagoa.

CONCLUSÕES

Foi construído um modelo de escoamento subterrâneo para a região da lagoa do Bonfim utilizando-se o Método de Elementos Analíticos (AEM) combinado ao Método de Imagens. A combinação dos métodos permitiu que as fronteiras regionais do aquífero fossem representadas ao longo de uma faixa de extensão infinita. Essa representação impõe que as fronteiras sejam retilíneas tornando a análise do escoamento grosseira em regiões próximas às mesmas.

Em contrapartida, a representação regional do efeito devido à recarga pôde ser realizada de forma bastante simples e compreensiva por meio de uma função parabólica. A escala local do escoamento no aquífero Barreiras foi representada mediante o uso dos elementos analíticos. A imposição das condições de contornos regionais aos efeitos gerados no interior do aquífero foi obtida mediante a manipulação simétrica dos elementos analíticos em torno das fronteiras, segundo postula o Método de Imagens.

Finalmente os resultados obtidos permitiram mais duas im-

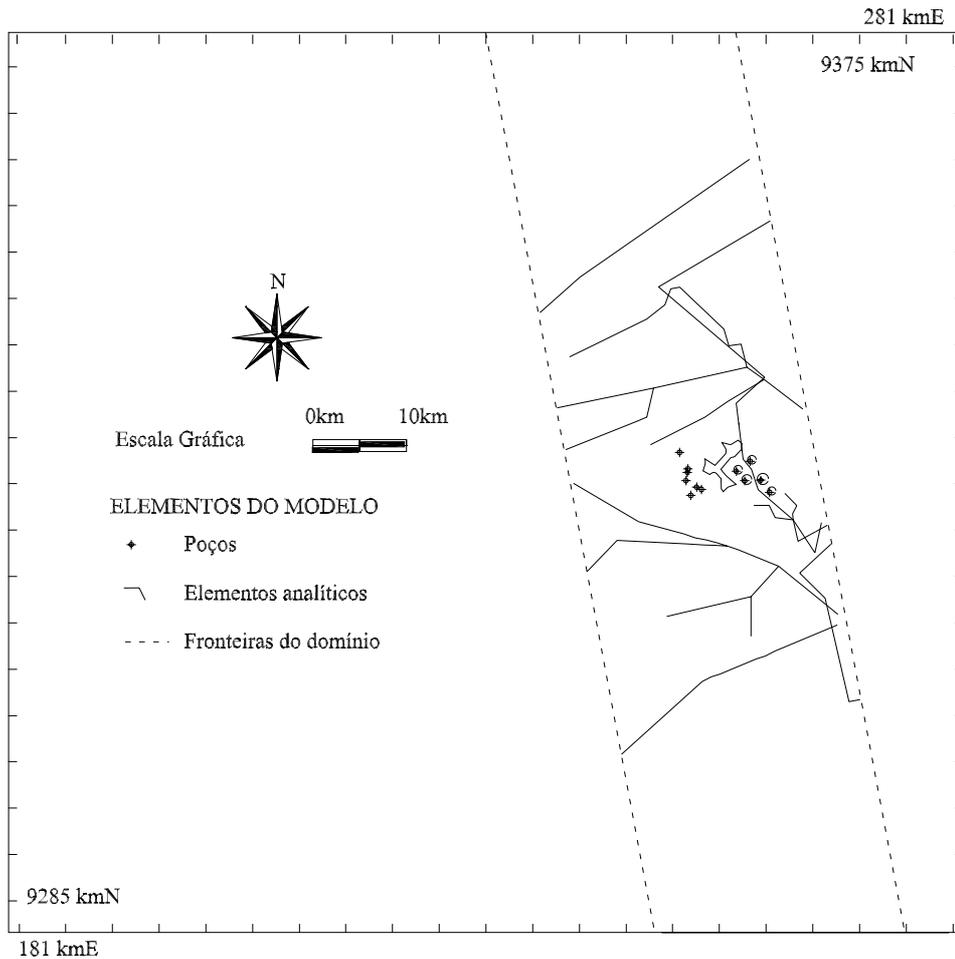


Figura 8 – Aproximação regional para a faixa de aquífero.

portantes conclusões: 1) a calibração de um valor de uniforme para a recarga regional em 0,9 mm/dia; e 2) a redução do nível médio de água na lagoa do Bonfim em 5,0 m em regime permanente devido à influência do sistema de captação. O valor da taxa de recarga obtido é superior aos resultados encontrados em estudos anteriormente realizados na região (e.g. Pereira, 2001). Essa discrepância é atribuída às diferentes naturezas dos métodos utilizados em campo e em simulação. Entretanto, as diferenças poderão ser melhor interpretadas à medida que forem obtidos novos resultados sobre o comportamento sazonal e espacial da recarga na região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo 02/09696-3) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento

Tecnológico (CNPq, processo 141354/2001-1).

REFERÊNCIAS

- BAKKER, M. 2004. Transient analytic elements for periodic Dupuit-Forchheimer flow. *Advances in Water Resources*, 27(1): 3–12.
- BAKKER M & ANDERSON EI. 2004. Steady Flow to a Well near a Stream with a Leaky Bed. *Ground Water*, 41(6): 833–840.
- BAKKER M, KELSON V & ZAADNOORDIJK WJ. 2006. An Object-Oriented Analytic Element Program Written in Python. Disponível em: <<http://www.engr.uga.edu/~mbakker/timsingle.html>>. Acesso em: 19 jun. 2007.
- BAKKER M & STRACK ODL. 2003. Analytic elements for multiaquifer flow. *Journal of Hydrology*, 271(1-4): 119–129.
- BATISTA JAN. 2001. Caracterização da reserva hídrica da lagoa do Bonfim frente à operação da adutora Monsenhor Expedito RN, UFRN, Natal, Dissertação de Mestrado, 131 p.

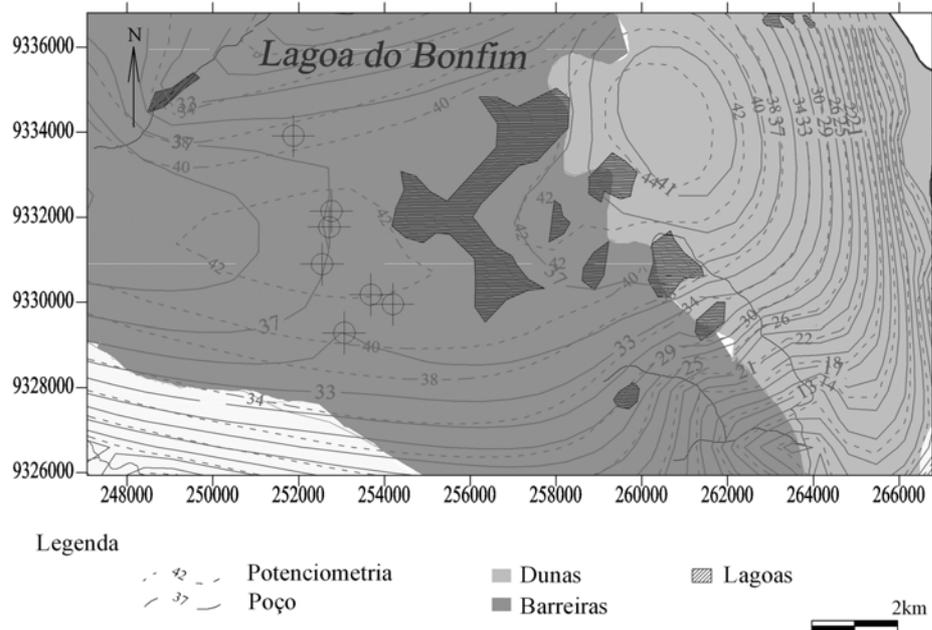


Figura 9 – Distribuição potenciométrica comparativa entre o cenário natural (linhas tracejadas) e o cenário atual de captação (linhas contínuas).

BATISTA JAN, WENDLAND E & SCHULZ HE. 2005. Acoplamento de Expressão Unidimensional de Recarga a Modelos de Elementos Analíticos. *Tendências em Matemática Aplicada*, 6(1): 43–53.

BEAR J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Elsevier Science, Nova York. 784 p.

FITTS CR. 1997. Analytic Modeling of Impermeable and Resistant Barriers. *Ground Water*, 35(2): 312–317.

FURMAN A & NEUMAN SP. 2003. Laplace-transform analytic element solution of transient flow in porous media. *Advances in Water Resources*, 26(12): 1229–1237.

GOMES CC & CASTRO MAH. 2002. Análise Comparativa entre a Modelagem de aquíferos Regionais Utilizando o Método de Elementos Analíticos (Split) e o Método de Diferenças Finitas (Modflow). In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 16 p.

HAITJEMA HM. 1995. *Analytic element modeling in groundwater flow*, Academic Press, California. 394 p.

JANKOVIĆ I & BARNES R. 1999a. High-order line elements in modeling two-dimensional groundwater flow. *Journal of Hydrology*, 226(3-4): 211-223.

JANKOVIĆ I & BARNES R. 1999b. Three-dimensional flow through large numbers of spheroidal inhomogeneities. *Journal of Hydrology*, 226(3-4): 224–233.

KRAMER SR, HAITJEMA HM & KELSON VA. 2003. Working with WhAEM2000: Source Water Assessment for a Glacial Outwash Wellfield,

Vincennes, Indiana. Disponível em: <http://www.epa.gov/ATHENS/publications/reports/EPA_600_R00_022.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2007.

LUTHER K & HAITJEMA HM. 2000. Approximate analytic solutions to 3D unconfined groundwater flow within regional 2D models. *Journal of Hydrology*, 229: 101–117.

MANUEL FILHO J & CASTRO VLL. 2002. Avaliação e Exploração do aquífero Dunas-Barreiras na Região do Subsistema Lacustre do Bonfim-RN. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 20 p.

MELO JG & FEITOSA EC. 1998. Pesquisa hidrogeológica do complexo lagunar do Bonfim, SERHID, Natal, 100 p.

PEREIRA R. 2001. Caracterização hidrológica do sistema lacustre Bonfim/RN, IG/UFRJ, Rio de Janeiro, Tese de doutorado, 212 p.

PEREIRA R, GUIMARÃES JÚNIOR JA & SILVA JÚNIOR GC. 2003. Estado da Arte da Bacia Hidrogeológica do Sistema Lacustre Bonfim, RN, Nordeste do Brasil. *Rev. Águas Subter.*, 17: 41–47.

PEREIRA R, GUIMARÃES JÚNIOR JA, SILVA JÚNIOR GC & MATTOS A. 2002. Avaliação do Impacto da Captação de Água na lagoa do Bonfim, RN – Brasil. *Rev. Águas Subter.*, 16: 75–84.

SERHID. Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. 1998. Plano Estadual de Recursos Hídricos do RN, Hidroservice-Ltda., Natal, 267 p.

STRACK ODL. 1989. *Groundwater Mechanics*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. 688 p.

- STRACK ODL. 1999. Principles of the analytic method. *Journal of Hydrology*, 226: 128–138.
- STRACK ODL & HAITJEMA HM. 1981a. Modeling double aquifer flow using a comprehensive potential and distributed singularities, 1. Solution for homogeneous permeability. *Water Resour. Res.*, 17(5): 1535–1549.
- STRACK ODL & HAITJEMA HM. 1981b. Modeling double aquifer flow using a comprehensive potential and distributed singularities, 2. Solution for inhomogeneous permeabilities. *Water Resour. Res.*, 17(5): 1551–1560.
- STRACK ODL, JANKOVIĆ I & BARNES R. 1999. The superblock approach for the analytic element method. *Journal of Hydrology*, 226(3-4): 179–187.
- STREITZ A, SEABERG J & HANSEN D. 1999. Metropolitan Area Groundwater Model – The Metro Model. Disponível em: <<http://www.pca.state.mn.us/water/groundwater/metromodel.html>> . Acesso em: 19 jun. 2007.
- ZAARDNOORDIJK WJ & STRACK ODL. 1993. Area sinks in the analytic element method for transient groundwater flow. *Water Resour. Res.*, 29(12): 4121–4129.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

José Anderson do Nascimento Batista concluiu a graduação em Engenharia Civil e o mestrado em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Concluiu o doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo em 2006 e foi Consultor Técnico da Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial durante os anos de 2005 e 2006. Atualmente é bolsista de Pós-Doutorado da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo com a linha de pesquisa “Simulação de Escoamento em Meios Porosos com Domínios Alongados”.

Edson Wendland concluiu o doutorado em Engenharia Civil na Ruhr-Universität Bochum em 1995. Atualmente é Professor Associado da Universidade de São Paulo e Professor visitante na University of Applied Sciences Cologne. Atua na área de Geociências, com ênfase em Hidrogeologia. Publicou 12 artigos em periódicos especializados e 57 trabalhos em anais de eventos. Possui 13 capítulos de livros e 3 livros publicados. Possui 2 softwares e outros 30 itens de produção técnica. Orientou 9 dissertações de mestrado e 3 teses de doutorado. Atualmente participa de 3 projetos de pesquisa, dos quais 2 coordena. Interagiu com 76 colaboradores em co-autorias de trabalhos científicos. Os termos mais frequentes na produção científica e tecnológica são: simulação numérica, Aquífero Guarani, método de elementos finitos e transporte de poluentes.

Harry Edmar Schulz é Professor Titular e Livre Docente na área de Fenômenos de Transporte, Doutor e Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo, graduado como Engenheiro Civil na Fundação Universidade Regional de Blumenau. Realizou dois estudos de pós-doutoramento no Institut für Hydromechanik na Universität Karlsruhe, Alemanha. Atua na modelagem de Fenômenos de Transporte em escoamentos turbulentos em meios porosos. Adicionalmente atua na área de Resíduos Sólidos, voltado para questões ambientais. Os temas em meios porosos têm envolvido tanto o transporte de água propriamente dito, como o transporte de poluentes, notadamente aqueles derivados de petróleo.