

Modelagem Numérica Aplicada à Análise de Medidas de Controle da Intrusão Marinha na Região Sul da Planície do Recife (PE)

Gustavo José Barros Gurgel, Suzana M.G.L. Montenegro, Jaime J. S. P. Cabral

Dept. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco

gustavo-gurgel@ibest.com.br, suzanam@ufpe.br, jcabral@ufpe.br

Recebido: 14/09/06 – revisado: 09/11/06 – aceito: 19/10/07

RESUMO

As águas subterrâneas representam uma forma segura de armazenamento de água e em alguns lugares deveriam ser utilizadas apenas como reserva estratégica. Porém, o gerenciamento inadequado dos aquíferos costeiros permite o surgimento de problemas que podem representar o esgotamento das águas subterrâneas e o risco da intrusão marinha. Demandando 14 m³/s, a Região Metropolitana do Recife tem enfrentado problemas com o déficit do abastecimento público. Uma crise nos anos de 1998 e 1999 levou os mananciais de superfície a níveis próximos ao colapso, gerando grande aumento do número de poços perfurados. O objetivo do presente estudo foi analisar através de modelagem numérica a possibilidade de ocorrência de intrusão marinha na Planície do Recife, bem como o efeito de medidas de controle desse processo. Foram escolhidos os bairros do Pina e Boa Viagem em Recife, e Piedade em Jaboatão dos Guararapes como área objeto do estudo, pela disponibilidade de dados de monitoramento da salinidade da água subterrânea. Analisando dados de condutividade elétrica, foi possível identificar as regiões críticas da área monitorada. Para a modelagem computacional foi definida uma malha de nós numa seção transversal que abrange 15 Km sendo 5 Km no mar e 10 no continente. Foi escolhido o modelo computacional SHARP versão 1.1 de 10/05/99 desenvolvido pela USGS. Utilizando dados de poços cadastrados por órgãos do governo, dados obtidos em trabalhos publicados e de campo, foram simulados cenários para várias configurações de recarga e de bombeamento.

Palavras-chave: Intrusão marinha, aquífero costeiro, modelagem matemática.

INTRODUÇÃO

Aquíferos costeiros são altamente sensíveis às mudanças de carga e de fluxo. A falta de gerenciamento ou o gerenciamento inadequado de um aquífero em condições de superexploração, por exemplo, pode levar ao avanço da cunha salina e à indisponibilidade do aquífero como fonte de água doce.

A questão da intrusão marinha em aquíferos costeiros afeta grande parte das cidades costeiras que utilizam água subterrânea para abastecimento público. Este assunto vem sendo objeto de pesquisas nas últimas décadas. Na Região Metropolitana do Recife, o assunto já vem sendo motivo de preocupação desde a década de setenta, e gradativamente, à medida que avança o conhecimento geológico da região, são feitos novos estudos e prognósticos (Cabral e Montenegro, 2004).

Com uma demanda de 14 m³/s, a Região Metropolitana do Recife composta por 14 municípios e uma população de 3,3 milhões de habitantes

(IBGE, 2000) tem enfrentado sérios problemas com o déficit do abastecimento público. Uma crise no abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife nos anos de 1998 e 1999, devida a precipitações abaixo do normal, levou os mananciais de superfície a níveis próximos ao colapso. Este fato implicou em forte racionamento e mostrou o quanto o sistema de abastecimento está suscetível a estiagens.

As águas subterrâneas, que já eram utilizadas como oferta complementar, durante este período sofreram uma procura maior por representar uma fonte mais confiável de abastecimento. Em consequência disto, por constituir-se numa fonte que possibilita maior regularidade de vazões, entre outras vantagens, um grande número de poços foi perfurado por empresas privadas na planície do Recife, para servirem residências, hotéis e instituições públicas. Os aquíferos explotados foram o Beberibe, Cabo e Boa Viagem.

Costa et al. (1998) e CONTECNICA (1998) relataram que a contribuição de águas subterrâneas para o sistema de distribuição da COMPESA – Com-

panhia Pernambucana de Saneamento era de 1,6 m³/s, explotados por 110 poços no aquífero Beberibe ao norte da RMR. Logo após a estiagem de 1998/1999 novas baterias de poços foram construídas, sendo que atualmente as águas subterrâneas contribuem mais que em 1998 para o sistema público de abastecimento, quando todos os poços estão ativados. Além dos poços da COMPESA, um grande número de poços particulares vêm sendo utilizados principalmente para abastecer edifícios residenciais.

Em um estudo denominado HIDROREC II, Costa et al. (2002) apresentaram um cadastro com 4.582 poços e avaliaram em 13.000 o número de poços públicos e privados existentes só no município de Recife, o que mostra que a perfuração de poços continuou crescendo mesmo depois da crise no abastecimento. Dos poços avaliados, 33% eram profundos, ou seja, com mais de vinte metros de profundidade.

Considerando que a maioria dos poços não são cadastrados, pode-se imaginar o acentuado crescimento do número de poços e consequente exploração dos aquíferos.

O objetivo desse trabalho foi analisar através de modelagem numérica a ocorrência de intrusão marinha em sistema aquífero na planície do Recife, bem como o efeito de medidas de controle desse processo. Considera-se a atual condição de exploração e impermeabilização do solo que reduz a infiltração por recarga de águas pluviais, bem como a previsão de cenários futuros que poderão ajudar na definição de métodos e modelos gerenciais que visem à conservação das águas subterrâneas nos aspectos de quantidade e qualidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área estudada localiza-se na Região Metropolitana do Recife delimitada pelas coordenadas UTM 9098000 e 9112000 mN e UTM 283000 e 298000 mE, meridiano 33°. A precipitação média anual é de 2.458 mm, sendo junho o mês com maior concentração de chuvas com média de 389,6 mm e novembro o mês mais seco com uma média de 47,8 mm. Toda caracterização descrita foi baseada nos dados climatológicos da Estação Meteorológica de Recife/PE (nº 82/900/DNMet, 1992), numa série de 1961 a 1990.

A cidade de Recife encontra-se na sua maior parte no domínio hidrogeológico da planície do

Recife, inserida geotectonicamente na Bacia Pernambuco/Paraíba e Bacia do Cabo, respectivamente a norte e a sul do Lineamento Pernambuco.

A Norte do lineamento encontra-se o aquífero Beberibe e a sul encontra-se o aquífero Cabo com espessura média de 80 m. Recobrindo ambos encontra-se o aquífero Boa Viagem com espessura média de 40 m, separado dos aquíferos inferiores por uma camada semiconfinante formada pela porção basal do aquífero Boa Viagem constituída de argila, argila arenosa e areia argilosa com espessura média de 20 m (Monteiro, 2000).

A configuração geológica de limitação acima e abaixo por camadas impermeáveis somada à condição de pressão da água, imprime ao aquífero Cabo a característica de aquífero confinado. O aquífero Cabo é muito explotado através de poços privados.

Considerando que o aquífero Boa Viagem possui uma superfície livre, submetida apenas à pressão atmosférica, este aquífero assume a característica de freático.

O estudo foi realizado na parte sul da planície de Recife (Figura 1), e um resumo das principais características dos aquíferos é apresentado na tabela 1.

Tabela 1 - Principais características dos aquíferos estudados (Costa et al., 1998)

Parâmetros	Características	
	Boa Viagem	Cabo
Granulometria dos sedimentos	Alternância de areias e argilas	Predom. Arenitos argilosos
Permeab. e condutiv. hidráulica	Baixa a elevada	Média a baixa
Transmissividade	Baixa a média	Regular
Coef. de armaz. ou porosidade efetiva	Baixa a elevada	Regular
Vazões	Média a elevada (17 m ³ /h) ^a	Inferiores a 10 m ³ /h
Vazões específicas	Elevada (4,5 m ³ /h.m em média)	Baixas (< 1 m ³ /h.m)

A escolha da região dos bairros do Pina e Boa Viagem, assim como do aquífero Cabo, baseou-se tanto no zoneamento das áreas explotáveis apresentados por Costa et al. (1998) e Costa et al. (2002),

que consideraram o rebaixamento crescente do nível das águas subterrâneas e o crescimento acentuado do número de poços profundos na região, como na análise dos dados do monitoramento da condutividade elétrica, realizado desde 1999 através de diversos projetos de pesquisa (Montenegro et al., 2000; Montenegro et al., 2002).

Este monitoramento proporcionou a observação de poços próximos à costa com salinização crescente, e permitiu a identificação de pontos críticos da área monitorada indicados pelas setas na Figura 2, onde os valores médios obtidos eram maiores que o valor usualmente aceitável de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Definição das seções estudadas

Nesta área, em estudos anteriores, foram definidas com base na concentração de poços, seções perpendiculares à linha de costa (Figura 1), que através dos perfis geológicos fornecidos pelas empresas perfuradoras, tiveram sua geologia representada em cortes. Estes perfis serviram de base para a confecção dos modelos conceituais dos cenários de simulação.

Analizando-se a localização dos pontos críticos identificados através do monitoramento e sobrepondo as seções A, B e C, foi possível verificar uma proximidade entre os pontos críticos e as respectivas seções (Figura 2). Portanto, optou-se por utilizar as seções A, B e C e os respectivos perfis litológicos para a realização deste estudo.

MODELO COMPUTACIONAL

Escolha do modelo

Considerando a simplicidade de operação, a velocidade de resposta e os estudos anteriores realizados por Essaid (1990), Bear et al. (1999) e Lafayette et al. (2000), foi escolhido o modelo SHARP, versão 1.1 de 10/05/1999, desenvolvido pela USGS – United States Geological Survey, disponível como software de domínio público, para a realização das simulações deste estudo.

Também foram consideradas a carência de dados geológicos e hidrodinâmicos da área de estudo o que impediu a escolha de um modelo mais sofisticado para a realização das simulações computacionais.

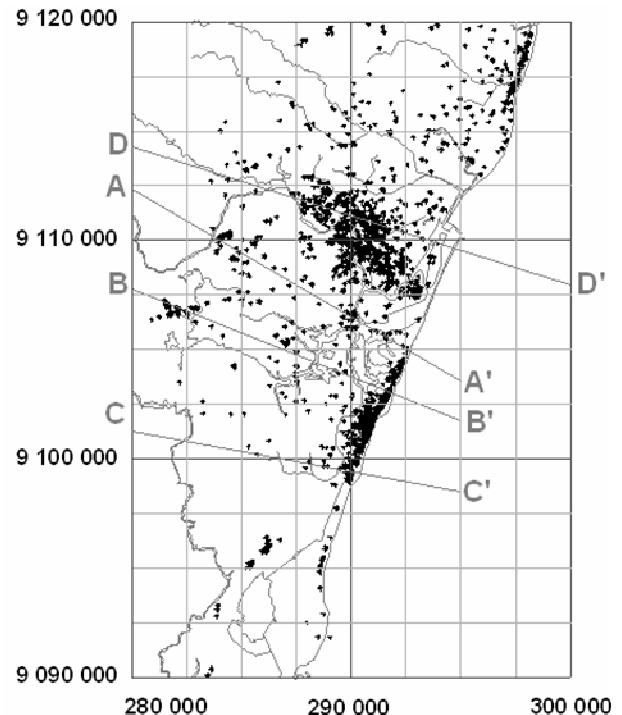


Figura 1 - Região costeira da Planície do Recife, com ilustração de poços e seções perpendiculares à costa.

Características do modelo computacional SHARP

O SHARP é um modelo de diferenças finitas quasi-tridimensional, escrito na linguagem FORTRAN 77, que simula o fluxo de água doce e água salgada, separada por uma interface, no sistema aquífero costeiro. O modelo utiliza múltiplos aquíferos, separados por camadas confinantes, livres, ou semiconfinantes (Essaid, 1990).

Para cada aquífero a interação da equação de fluxo de água doce e água salgada é resolvida. O sistema linear resultante é discretizado usando um esquema de diferenças finitas implícito. As posições do topo e base das interfaces, dentro de uma malha de diferenças finitas, utilizam extrapolação linear das elevações, calculadas nos pontos da malha.

O modelo considera uma interface abrupta de separação água doce/salgada de acordo com as equações

$$h_s \cdot \gamma_s = (h_s + \Phi_f) \cdot \gamma_f \quad (1)$$

$$h_s = \frac{\gamma_f}{(\gamma_s - \gamma_f)} \cdot \Phi_f \quad (2)$$

Onde o índice “*s*” refere-se à água salgada e “*f*” refere-se à água doce (fresh), γ_s e γ_f são os pesos específicos, h_s é a profundidade da cunha salina abaixo do nível do mar e Φ_f e Φ_s são as cargas hidráulicas em relação ao nível do mar.

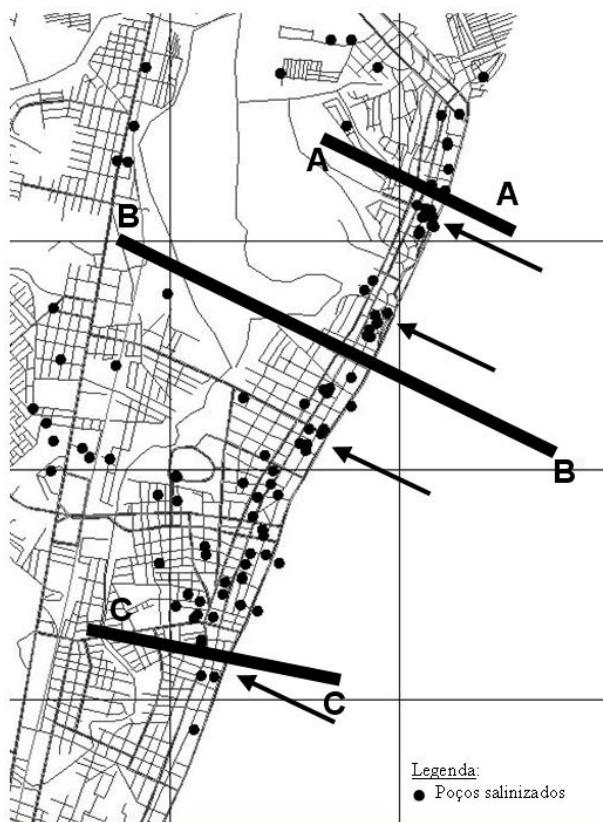


Figura 2 - Posição das seções de estudo.

Para cada camada aquífera, o domínio de água doce é acoplado com água salgada através da interface de acordo com as equações

$$S_f \cdot \frac{\partial \Phi_f}{\partial t} = -\nabla \cdot q_f \quad (3)$$

$$S_s \cdot \frac{\partial \Phi_s}{\partial t} = -\nabla \cdot q_s \quad (4)$$

S_f e S_s são os armazenamentos específicos (L^{-1}) e q_f e q_s são as descargas específicas (LT^{-1}).

Este programa requer todos os parâmetros típicos de entrada dos modelos de fluxo de águas

subterrâneas. Além desses, em razão da resolução das equações de água doce e água salgada, necessita de entradas adicionais. A densidade, porosidade efetiva, condutividade hidráulica, armazenamento específico, espessura de camadas confinantes e potenciometria de água doce e salgada, devem ser especificadas, assim como a viscosidade da água e o armazenamento específico do aquífero confinado. Elevações da batimetria são especificadas para representar as condições limites.

Considerações práticas para utilização do modelo SHARP.

O modelo SHARP pode ser inicializado de duas maneiras: como uma nova simulação ou como continuação de simulação anterior. Para simulação contínua, o usuário utiliza o resultado da simulação anterior e insere o valor de carga hidráulica da água doce, posição da interface e fatores de projeção da interface, para determinação dos novos valores de topo e base da interface.

Os limites sem fluxo são especificados utilizando nós inativos indicados por condutividade hidráulica zero. Para blocos não confinados no aquífero superior, uma constante de fluxo pode ser especificada para recarga. Para todas as camadas, o bombeamento pode ser usado para especificar um fluxo constante. O valor de bombeamento positivo representa extração de água no bloco e um valor negativo adição de água no bloco.

Células com carga constante de água doce podem ser especificadas assumindo um valor de armazenamento específico negativo. Também as células com carga constante de água salgada podem ser especificadas.

O modelo é relativamente sensível ao tamanho do intervalo de tempo. Se o intervalo de tempo for longo comparado à taxa de movimentação da interface, a solução será instável devido ao excesso de ajustes da interface por período de tempo.

O modelo SHARP aceita dois métodos de drenagem: o de mistura completa e o de mistura restrita. Para o método de mistura completa, o modelo assume que a quantidade de água doce drenada para água salgada ou água salgada drenada para água doce é pequena em relação ao volume total, e mistura-se instantaneamente fazendo parte do domínio para onde drenou.

Para o método de mistura restrita, o modelo permite o fluxo de água doce ou salgada entre aquíferos nas zonas onde a água tem as mesmas características, porém, não permite a drenagem de cima para baixo de água salgada em água doce quando o

aqüífero superior apresenta em um mesmo ponto água salgada e o aqüífero inferior apresenta água doce.

MODELO CONCEITUAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO

O modelo conceitual para os cenários simulados foi definido como sendo quasi-tridimensional, que simula uma seqüência de aqüíferos superpostos com intercalações de outras camadas semipermeáveis. Por estarem sendo estudadas seções transversais, as células das faixas laterais são inativas, têm apenas a função de impedir a influência do fluxo lateral.

Como condições de contorno foram consideradas: para a base do sistema a condição de fluxo nulo, uma vez que a base do aqüífero Cabo é uma camada rochosa impermeável; para a fronteira à leste com o mar, carga constante e para a fronteira à oeste, fluxo dependente da carga. Para o topo do modelo duas características foram consideradas: na parte continental a condição atribuída é de fluxo constante através de recarga; e sobre o mar, carga constante ao nível do mar.

Discretização das seções estudadas

As seções estudadas foram discretizadas em malhas de elementos. A malha definida para as seções A e B, tem dimensões de 1,5 Km distribuídos em 3 colunas de 500 m de largura e 15 Km distribuídos em 100 linhas com dimensões que variam de 50 a 400 m de comprimento.

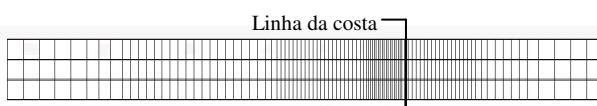


Figura 3 - Malha de nós definida para as seções A e B.

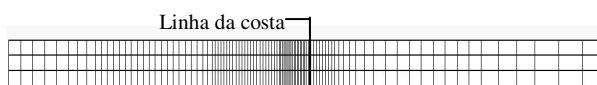


Figura 4 - Malha de nós definida para a seção C.

Para a seção C, por ser menor, foi definida uma malha com dimensões de 0,75 Km distribuídos em 3 colunas de 250 m de largura e 10 Km distribuídos em 100 linhas com dimensões que variam de 25 a 400 m de comprimento.

As figuras 3 e 4 apresentam o detalhamento das malhas das seções A, B e C. Nas seções A e B, existem células com 50, 75, 100, 150, 200, 300 e 400 m de comprimento. Na seção C existem células com 25, 37,5, 50, 75, 100, 150, 200, 300 e 400 m de comprimento.

Observa-se nas figuras 3 e 4 o refinamento da malha próximo à linha da costa, devido a este ser o provável local onde se encontra a interface água doce x água salgada. Na figura 6, observa-se o posicionamento das malhas de nós das seções A, B e C em relação à área de estudo.

Foi assumido que a camada semiconfinante (aqüítardo) prolonga-se por baixo do leito marinho até o fim da malha de estudo, que no caso foi considerado a 5 km de distância da linha da costa. Esta hipótese é plausível, mas não foi ainda comprovada até que distância da linha da costa o aqüítardo avança.

Obtenção de dados

Os dados dos poços utilizados neste estudo foram obtidos através dos cadastros de poços de órgãos públicos do estado de Pernambuco como a Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos- CPRH e a Secretaria de Ciências e Tecnologia - SECTMA, assim como trabalhos realizados anteriormente como o HIDROREC I (Costa *et al.*, 1998), HIDROREC II (Costa *et al.*, 2002) e o GIAREC (Cabral *et al.*, 2000).

Os dados dos poços obtidos nas diversas fontes foram agrupados e consolidados. Em seguida foram georeferenciados através da utilização do software ArcView e sobrepostos às malhas das seções. Apenas os poços que coincidiam com a malha e que possuíam informação do valor da vazão de bombeamento, além de outros próximos (Figura 5) foram selecionados.

Tabela 2 - Parâmetros hidrodinâmicos dos aqüíferos (Costa *et al.* 2002)

Coeficientes Hidrodinâmicos	Aqüíferos	
	Cabo	Boa Viagem
Condutiv. Hidráulica	$1,0 \times 10^{-5}$ m/s	$1,7 \times 10^{-4}$ m/s
Porosidade Eficaz	$7,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$
Coef. de Armazenam.	$1,0 \times 10^{-4}$	-

Os valores dos parâmetros hidrodinâmicos utilizados nas simulações foram obtidos no HIDROREC II e foram utilizados para todas as seções. As

seções A, B e C são formadas pelos aquíferos Cabo e Boa Viagem. A tabela 2 apresenta os principais parâmetros utilizados. Para a simulação do aquíartido foi considerada a condutividade hidráulica de $1,0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$.

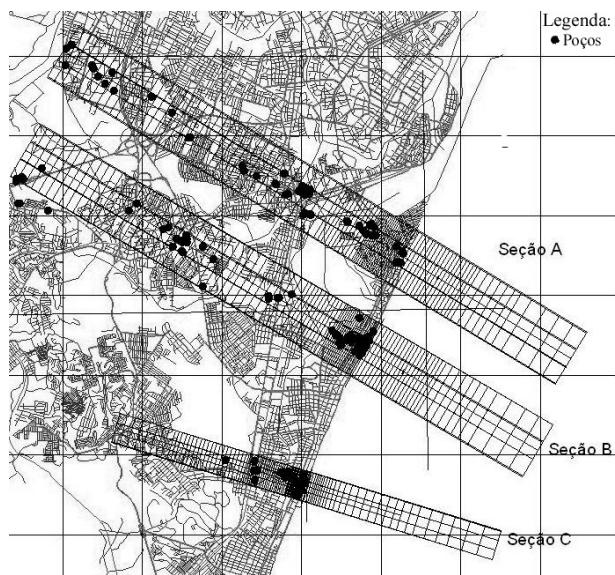


Figura 5 - Posição das malhas de nós das seções A, B e C e poços coincidentes com a malha das seções.

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Considerou-se que a interface estava em uma posição de equilíbrio até a década de 70 antes de começar a exploração excessiva do aquífero.

Para inferir a posição de equilíbrio, foi adotada inicialmente uma interface inicial hipotética e o programa foi executado simulando vários anos sem bombeamento até que a posição da interface se estabilizasse.

Com a obtenção das posições das interfaces de equilíbrio, estas foram utilizadas como interfaces iniciais para as simulações dos cenários com bombeamentos.

Foi estudada a sensibilidade da variação da duração do intervalo de tempo. Foram testados valores de um dia, uma semana, um mês, três meses, um semestre, um ano e cinco anos. O valor adotado para as simulações foi o de uma semana, pois apresentou menos instabilidade em todas as seções.

Foi adotado o método de mistura restrita para a simulação das posições de equilíbrio, pois representa a posição mais conservativa, ou seja, mais

afastada da linha da costa, e o método de mistura completa na simulação dos cenários de bombeamento.

Considerando que a precipitação média anual da área de estudo é de 2.458 mm, e que a média mensal é de 204 mm, optou-se por considerar na análise da sensibilidade do modelo à recarga, os valores de 10, 15 e 20 mm/mês para as seções A e B e 10, 20 e 30 mm/mês para a seção C.

Estes valores representam respectivamente 5%, 7,5% e 10% do volume precipitado e foram escolhidos considerando que a área de estudo é bastante impermeável por ser urbanizada.

Devido à proximidade das posições encontradas para as recargas de 10 e 20 mm/mês, na seção C, não foram simuladas as posições de equilíbrio para a recarga de 15 mm/mês, e pelo mesmo motivo foi acrescida a opção de recarga com 30 mm/mês.

A metodologia para realização das simulações consiste nos seguintes passos para cada seção estudada:

1. Caracterização da seção a ser estudada com definição de parâmetros hidrodinâmicos, geometria, recarga, potociometria e posição inicial hipotética;
2. Simulação dos cenários com variação da recarga até a obtenção das posições de equilíbrio, ou seja, realização de simulações para obtenção da interface de equilíbrio para cada valor de recarga;
3. Definição do bombeamento a ser utilizado no cenário;
4. Simulação dos períodos desejados considerando os cenários de bombeamento;

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Simulação da posição da interface inicial de equilíbrio

As primeiras simulações trataram da verificação da posição de equilíbrio da interface em condições naturais, ou seja, sem interferência de bombeamento. O objetivo foi encontrar a situação hidrodinâmica da época em que não existiam poços bombeando água dos aquíferos.

Foram realizadas simulações considerando três posições para as interfaces iniciais hipotéticas, as

quais após alguns anos de simulação resultavam em uma interface em equilíbrio. As posições de equilíbrio encontradas para cada interface hipotética inicial apresentaram-se praticamente coincidentes. Por isso o resultado é representado como apenas uma linha.

Para as figuras representativas de resultados de simulações vale a legenda da figura 6 a seguir.

Legenda:



Figura 6 - Legenda dos resultados de simulações.

Nas figuras 8, 9 e 10 as interfaces desenhadas em linha cheia representam as posições iniciais hipotéticas, e as tracejadas as posições de equilíbrio obtidas para cada valor de recarga simulado.

As linhas tracejadas da esquerda para a direita representam os resultados obtidos para as recargas de 10, 15 e 20 mm/mês respectivamente para as seções A e B e 10, 15 e 30 mm/mês para a seção C.

A legenda para as figuras representativas de resultados de simulações é apresentada na figura 8 a seguir.

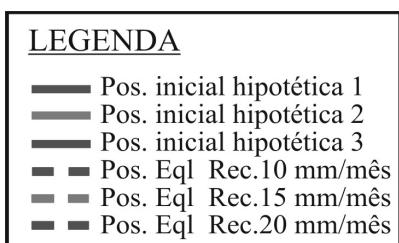


Figura 7 - Legenda para as figuras 8, 9 e 10.

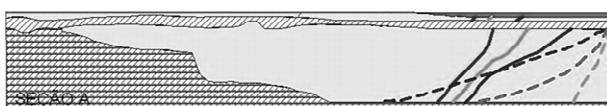


Figura 8 - Simulação das interfaces de equilíbrio – seção A.

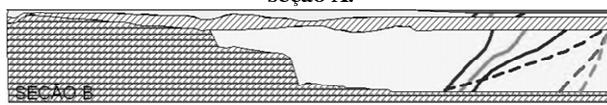


Figura 9 - Simulação das interfaces de equilíbrio – seção B.

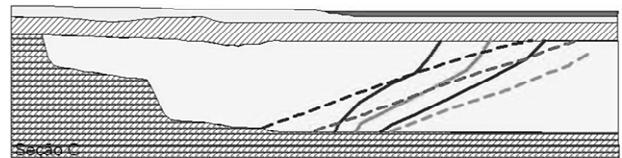


Figura 10 - Simulação das interfaces de equilíbrio – seção C.

Considerando as figuras anteriores, observa-se que quanto maior a recarga aplicada, mais afastada da linha da costa encontra-se a posição de equilíbrio. Este resultado demonstra a sensibilidade do modelo à variação da recarga.

Nota-se que na seção C apesar da variação da recarga ter sido maior que nas seções A e B, as posições de equilíbrio encontradas não apresentam grande distanciamento entre si. Este comportamento explica-se por a seção C ter menor área de recarga que as seções A e B, e por isso, apresenta menor sensibilidade à variação da recarga.

Simulação de cenários

Estas simulações têm por objetivo verificar se a utilização de medidas de controle como barreira hidráulica e recarga artificial, impediriam a ocorrência da intrusão marinha, rebaixamentos e “upconings” (elevações localizadas de água salgada).

Foram consideradas como posições iniciais de equilíbrio as interfaces obtidas para recargas de 10 e 15 mm/mês nas seções A e B, e 30 mm/mês na seção C.

Considerando que a exploração de poços no aquífero Cabo foi iniciada a partir da década de 1970, foram simulados cenários para 50 e 100 anos de bombeamento. Os cenários simulados representam uma situação pior que a real, pois na realidade o aumento do bombeamento se deu de forma gradativa, e na simulação o início do bombeamento já considerou todos os poços existentes atualmente.

Atualmente está em vigor portaria que regulamenta a exploração de poços, conforme o mapa de zoneamento apresentado por Costa *et al.* (2002), onde foi proibida a perfuração de novos poços em algumas áreas do aquífero Cabo, e com controle e limitação de vazão em outras áreas do aquífero. Levando isto em conta foram considerados os seguintes cenários de bombeamento para as simulações:

1. Bombeamento atual dos poços cadastrados mais o acréscimo de quatro poços com pro-

fundidade de filtro entre -130 e -150 m nas células 50, 55, 60 e 70 para a seção A e filtro entre -120 e -150 m nas células 50, 60, 65 e 70 para as seções B e C. Todos bombeando 30 m³/h no aquífero Cabo.

2. Bombeamento atual dos poços cadastrados em cada seção mais o acréscimo de um poço de injeção com filtro entre -130 e -170 m, injetando uma vazão de 30 m³/h e de três poços bombeando 40 m³/h no aquífero Cabo, com profundidade de filtro entre -130 e -150 m para a seção A e filtro -120 e -150 m para as seções B e C.
3. Bombeamento atual dos poços cadastrados em cada seção mais o acréscimo de oito poços com profundidade de filtro entre -130 e -150 m na seção A e -120 e -150 m na seção B, sendo os quatro primeiros injetando e os quatro últimos bombeando a vazão de 30 m³/h no aquífero Cabo.

Os dados de bombeamento atual dos poços cadastrados, aplicados na seção A totalizam 816,91 m³/h, sendo 229,42 m³/h para o aquífero Boa Viagem e 587,49 m³/h para o aquífero Cabo, na seção B totalizam 547,6 m³/h, sendo 3,2 m³/h para o aquífero Boa Viagem e 544,4 m³/h para o aquífero Cabo, e na seção C totalizam 117,65 m³/h, sendo 5,16 m³/h para o aquífero Boa Viagem e 112,49 m³/h para o aquífero Cabo.

Por serem muitos poços e estarem distribuídos por toda a malha, os poços representativos do bombeamento atual não foram ilustrados nas figuras que apresentam os resultados de simulações.

Barreira hidráulica

Estas simulações têm por objetivo verificar se a utilização de recarga artificial, através de poços injetando água próximo à linha da costa, formando uma barreira hidráulica, evitaria a ocorrência do avanço da cunha e “upconings” em cenários com bombeamento elevado.

Foram simuladas as seções A e B considerando a recarga de 10 mm/mês. Nas figuras deste item, as linhas tracejadas correspondem à posição inicial da interface e as linhas cheias as interfaces obtidas para o período simulado. O poço cinza representa o poço de injeção.

Nas figuras 11 e 12 são apresentados os resultados para a seção A considerando o cenário de bombeamento 1.

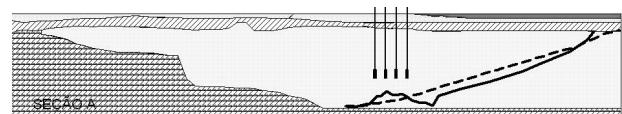


Figura 11 - Resultado da simulação da seção A para 50 anos, cenário de bombeamento 1.

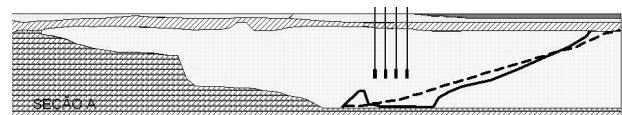


Figura 12 - Resultado da simulação da seção A para 100 anos, cenário de bombeamento 1.

Para os resultados das figuras 13 e 14 a seguir, foi considerado o cenário de bombeamento 2.

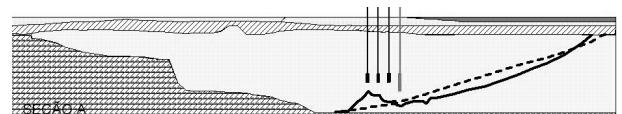


Figura 13 - Resultado da simulação da seção A para 50 anos, cenário de bombeamento 2.

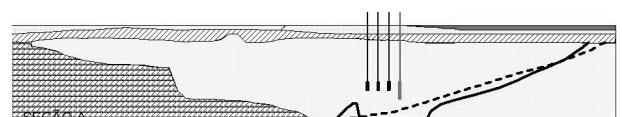


Figura 14 - Resultado da simulação da seção A para 100 anos, cenário de bombeamento 2.

Nas figuras 15 e 16 são apresentados os resultados para a seção B considerando o cenário de bombeamento número 1.

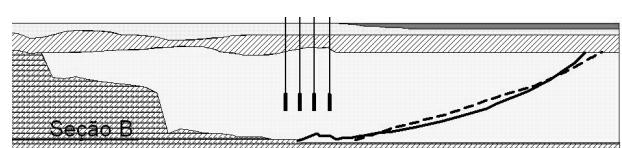


Figura 15 - Resultado da simulação da seção B para 50 anos, cenário de bombeamento 1.

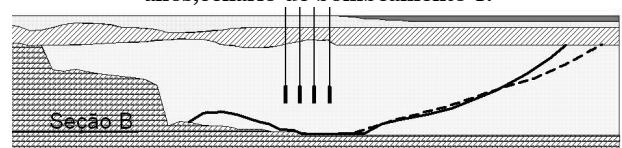


Figura 16 - Resultado da simulação da seção B para 100 anos, cenário de bombeamento 1.

Para os resultados das figuras 17 e 18 a seguir, foi considerado o cenário de bombeamento número 2.

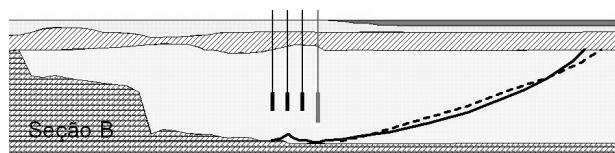


Figura 17 - Resultado da simulação da seção B para 50 anos e cenário de bombeamento 2.

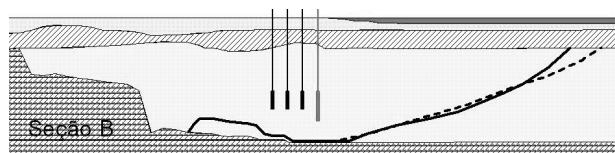


Figura 18 - Resultado da simulação da seção B para 100 anos e cenário de bombeamento 2.

Recarga artificial

Estas simulações têm por objetivo verificar se a utilização de poços injetando água por meio de poços dispersos, diferente da barreira hidráulica que utiliza um único poço, evitaria a ocorrência de avanços da interface, rebaixamentos e “upconings” em cenários com bombeamento elevado.

Foram simuladas as seções A e B considerando a recarga de 10 mm/mês. Nas figuras deste item, os poços com linhas cheias representam poços de bombeamento e os com linhas tracejadas poços de injeção, as linhas tracejadas correspondem à posição inicial da interface e as linhas cheias as interfaces obtidas para o período simulado.

Nas figuras 19 e 20 são apresentados alguns resultados para as seções A e B. Para estas simulações foi considerado o cenário de bombeamento 3.

Este cenário pode representar uma intervenção de gerenciamento de aquíferos, na qual alguns poços passariam a injetar água para recarga de aquífero.

Esta medida exige que ocorra a importação de águas de outros mananciais para a injeção dos poços. Porém, o benefício desta medida se reflete na proteção de outros poços que certamente explotam vazão superior à importada dos outros mananciais.

Essa medida, assim como a barreira hidráulica, também poderia ser implementada utilizando como fonte de água para injeção no aquífero a água de chuva captada no meio urbano (telhados, estacionamentos). Nesse sentido, experimento piloto e modelagem matemática para previsão de cenários foram realizados na área do presente estudo (Silva *et al.*, 2004).

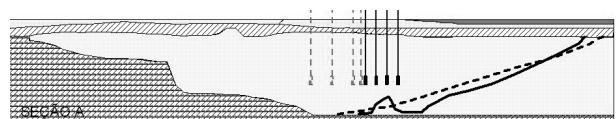


Figura 19 - Resultado da simulação da seção A para 100 anos, cenário de bombeamento 3.

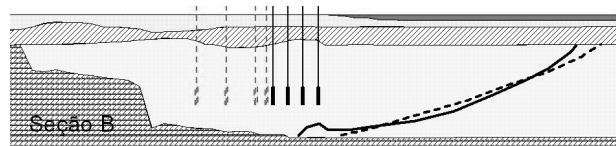


Figura 20 - Resultado da simulação da seção B para 100 anos, cenário de bombeamento 3.

Nos resultados apresentados observa-se que tanto para a seção A como para a seção B, não ocorrem rebaixamentos significativos na carga hidráulica, e apenas na seção A ocorrem “upconings” mais acentuados.

Nas figuras 21 a 23, são apresentadas algumas comparações entre os resultados obtidos para as seções A e B considerando o bombeamento 3 sem a inversão de fluxo, e os resultados obtidos considerando o bombeamento 3 com a aplicação de poços de injeção.

Nestas figuras as linhas tracejadas representam a interface inicial em equilíbrio, as linhas cheias as interfaces obtidas para a simulação sem recarga artificial, e as linhas pontilhadas os resultados obtidos para o cenário que considera o bombeamento 3 alterando-se o fluxo dos poços de injeção.

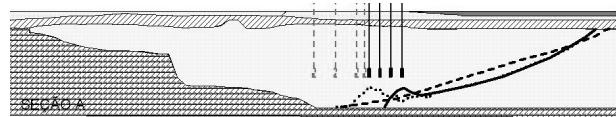


Figura 21 - Comparação do resultado da simulação da seção A para 50 anos, considerando o bombeamento 3 e a alteração de fluxo dos poços de injeção.

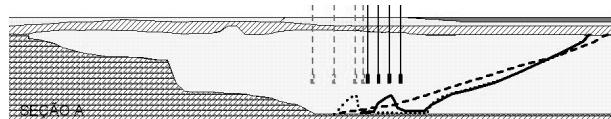


Figura 22 - Comparação do resultado da simulação da seção A para 100 anos, considerando o bombeamento 3 e a alteração de fluxo dos poços de injeção.

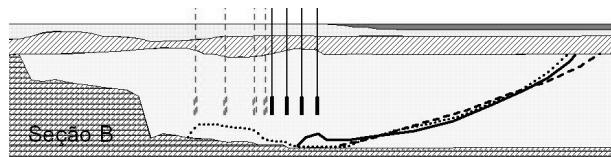


Figura 23 - Comparação do resultado da simulação da seção B para 100 anos, considerando o bombeamento 3 e a alteração de fluxo dos poços de injeção.

Observou-se nos resultados apresentados, que a aplicação de poços de injeção pode ser eficaz contra elevações em forma de cone (upconing) e principalmente rebaixamento da carga hidráulica.

Um ponto a considerar, são as variações do nível do mar devido ao efeito das marés. Em Recife, as variações do nível do mar não são muito grandes, a variação entre o máximo e o mínimo fica em torno de 1,50m, podendo chegar próximo de 2,0m somente em marés excepcionais. As simulações não conseguiram detectar variações significativas da posição da interface devido ao efeito das marés.

Outro ponto a considerar é a elevação do nível do mar devido ao aquecimento global. Com a elevação do nível do mar, a interface tenderá a se deslocar um pouco mais para dentro do continente. Com as mudanças climáticas previstas para as próximas décadas, além da subida do nível do mar, haverá também mudanças no regime de chuvas e consequentemente reduzindo as taxas de recarga, piorando ainda mais a situação do avanço da cunha salina. Planeja-se realizar um novo estudo brevemente para analisar o efeito das mudanças climáticas sobre a salinização dos aquíferos de Recife.

CONCLUSÕES

Foi observado nos resultados apresentados, que a aplicação de poço de injeção formando barreira hidráulica pode ser eficaz contra o avanço

generalizado da cunha salina, mas pode não garantir proteção efetiva contra "upconings".

Observou-se nos resultados apresentados, que a prática da recarga artificial através de poços de injeção pode ser eficaz contra elevações em forma de cone (upconing).

Os resultados devem ser entendidos como indicativos, pois, o modelo não pode incorporar algumas características do sistema real, tais como heterogeneidade da litologia, variabilidade espacial de recarga das águas pluviais, variabilidade temporal dos bombeamentos.

Novos estudos devem ser realizados visando fornecer subsídios para o gerenciamento do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PADCT/FINEP e ao CNPq/CT-HIDRO, pelo apoio financeiro recebido aos projetos de pesquisa que coletaram parte dos dados, e a CPRH – Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pelo acesso às informações dos poços.

REFERÊNCIAS

- BEAR, J.; CHENG, A. H. D., LOREK, S., QUAZAR, D. HERRERA, I. (1999). *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices*. Kluwer, Hodrecht.
- CABRAL, J. J. S. P. e MONTENEGRO, S. M. G. L. (2004). *Considerações sobre a Salinização dos Aquíferos Costeiros na Planície de Recife*, in Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento, Edufpe, Recife.
- CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M.; DEMÉTRIO, J. G. A. e MONTENEGRO, S. M. G. L. (2000). *A groundwater information system for Recife Metropolitan Region*, In Management Information System, edited by C. A. Bubbia and P. Pascolo, WIT Press, Southampton. USA.
- CONTECNICA. (1998). "Volume 7 – Disponibilidade e Situação de Mananciais para abastecimento da RMR", in Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica. Recife-PE.
- COSTA, W.; MANOEL FILHO, J.; SANTOS A. C.; BRITO, A. M.; SOUZA, F. J.; LOPES, A. V.; SANTOS A. J. (1998). *Estudo Hidrogeológico da Região Metropolitana do Recife*. UFPE/FADE, IRDC.

- COSTA, W. D. (2002). *Estudo Hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes – HIDROREC II*. Governo do Estado de Pernambuco. Secretaria de Recursos Hídricos.
- COSTA, W. D. ; COSTA, H. F.; FERREIRA, C. A.; MORAES, J. F. S.; VILLA VERDE, E. R.; COSTA, L. B. (2002) *Estudo Hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe, Jaboatão dos Guararapes – HIDROREC II*. Recife, PE: Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco.
- ESSAID, H. I. (1990). *The Computer model, a quasi-Three dimensional finite difference model to simulation fresh water and salt water flow in layered coastal aquifer system: Water Resources investigations Report 90-4130*. U.S. Department of the Interior. USGS. 1990.
- IBGE. (2000). *Censo Demográfico*. Brasília, DF.
- LAFAYETTE, K. P. V.; CABRAL, J. J. S. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L. (2000). "Modelagem de intrusão marinha na planície de Recife, utilizando o modelo SHARP." In Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Natal, Nov. 2000.
- MONTEIRO, A. B. *Modelagem de Fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície do Recife e seus encaixes*. Recife, PE. 2000. 104f. Dissertação de Mestrado - UFPE.
- MONTENEGRO, S. M. G. L., MONTENEGRO, A. de A., de LIMA, E. S., DEMÉTRIO, J. G. A., CABRAL, J. J. S. P., MANOEL FILHO, J., BARBALHO JR., C. G., VENÂNCIO, S. G., LAFFAYETE, K. P. V. (2000). "Dinâmica da salinização do aquífero Cabo na Região Metropolitana do Recife". In Anais do XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Fortaleza-CE.
- MONTENEGRO, S. M. G. L., MONTENEGRO, A. A. de A., CABRAL, J. J. S. P., DEMÉTRIO, J. G., MANOEL FILHO, J., LIMA, E. S. de, MATOS, E., PAIVA, A. (2002). "Groundwater salinity in the Cabo Aquifer in Recife Coastal Plain, Pernambuco, Brazil." In Anais do XXXII IAH & ALHSUD Congress – Groundwater and Human Development. Mar Del Plata, Argentina.
- SILVA, G. E. S. ; MONTENEGRO, S. M. G. L. ; MONTENEGRO, A. A. de A. ; COSTA, L. M. ; CAVALCANTI, G. ; EINSTEIN, A. (2004). *Avaliação do potencial de recarga artificial através de águas pluviais para recuperação da potociometria de aquífero costeiro na Planície do Recife- PE (Brasil)*. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004, Cuiabá. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.
- USGS. United State Geological Survey. <http://water.usgs.gov/software/sharp.html>. Internet. 20/06/04.

Numerical Modeling Applied to the Analysis of Control Measures for Marine Intrusion in the South Region of the Recife Plain (PE)

ABSTRACT

Groundwater is considered a safe, well protected source of water supply, and in some places it should be used as a strategic reserve. However, lack of adequate management in a coastal aquifer has led to several problems, including seawater intrusion. The Recife metropolitan region encompasses 14 towns and has 14 m³/s of water supply demand, and is facing deficit problems. A drought during 1998 and 1999, caused by low precipitation rates, led to a severe crisis, with the surface water reservoirs reaching very low storage levels. Consequently, the number of operating wells increased. This work aims at analyzing the possibility of seawater intrusion and the effect of measures to control this process in Boa Viagem and Cabo aquifer, considering the scenario of over-exploitation and injection wells. The neighborhoods of Boa Viagem and Pina in Recife, and Piedade in Jaboatão dos Guararapes, were chosen for the high number of operating wells and existing data on groundwater salinity. A conceptual model was defined for the mathematical modeling. A 15-km long cross-section (10 Km on the continent and 5 Km in the sea) was considered. The SHARP model (USGS) was used. Data from previous field investigations and studies were used and different scenarios were simulated considering pumping, natural and artificial recharge.

Key-words: Marine intrusion, coastal aquifer, mathematical modeling.