

AVALIAÇÃO DA POSSIBILIDADE DA INTRUSÃO SALINA NA PLANÍCIE DO RECIFE EM PERNAMBUCO

Gustavo José Barros Gurgel¹; Suzana M.G.L. Montenegro²;
Jaime J. S. P. Cabral² & Giancarlos Lins Cavalcanti³

Resumo - As águas subterrâneas representam uma forma segura de armazenamento de água e 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 o aumento do número de poços perfurados.

Foram escolhidos os bairros do Pina e Boa Viagem em Recife, e Piedade em Jaboatão dos Guararapes como área objeto do estudo. Analisando os dados do monitoramento da condutividade elétrica, foi possível definir os pontos críticos da área monitorada.

Para a modelagem computacional foi definida uma malha de nós 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 envolvendo a sensibilidade do modelo à recarga, ao bombeamento e à injeção de água nos aquíferos.

Abstract - Groundwater is considered a safe and well protect source of water supply, and it should be used as a strategic reserve. However, lack of adequate management in coastal aquifer has led to several problems, including seawater intrusion.

¹ Mestrando em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Depto. de Engenharia Civil, UFPE. Endereço: Rua João Sales de Menezes, 419 apt 501/B – Cidade Universitária, Recife/PE. CEP: 50670-390. Brasil. Tel: +55 (81) 3274-5302 – e-mail: gustavo.gurgel@bol.com.br.

² Prof. Doutor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Endereço: Rua Professor Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife/PE. CEP: 50670-901. Brasil. Tel: +55 (81) 2126-8709 – e-mail: suzanam@ufpe.br / jcabral@ufpe.br.

³ Graduando de Engenharia Civil. de Engenharia Civil, UFPE. Endereço: Rua Professor Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife/PE. CEP: 50670-901. Brasil. Tel: +55 (81) 2126-8709 – e-mail: suzanam@ufpe.br

Recife metropolitan region encompasses 14 towns and 14 m³/s of water supply demand, facing problems with deficit. A drought during 1998 and 1999, caused by low precipitation rates, led to severe crises with the surface water reservoir reaching very low storage levels. As consequence, the number of operating well increased.

This work aims to analyse the possibility of seawater intrusion in Boa Viagem and Cabo aquifer, considering the scenario of over-exploitation. The neighborhoods of Boa Viagem and Pina in Recife, and Piedade in Jaboatão dos Guararapes, have been chosen for their high number of operating wells.

A conceptual model has been defined for the mathematical model. A cross-section of 15 Km extension (10 Km in the continent and 5 Km in the sea) has been considered. SHARP model (USGS) has been used. Data from previous field investigation and studies was used. Simulation of different scenarios were performed considering pumping, natural recharge and artificial recharge.

Palavras-Chave – Salinização; aquífero costeiro; modelagem matemática.

INTRODUÇÃO

No mundo, 61% da população é abastecida com água subterrânea, sendo 43% através de poços tubulares, 12% por fontes ou nascentes e 6% por poços escavados tipo amazonas [1]. As águas subterrâneas representam a forma mais protegida de armazenamento de água.

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 [2] 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 susceptível a estiagens.

As águas subterrâneas já utilizadas como oferta complementar, durante este período sofreram uma procura maior por representar uma fonte mais confiável de abastecimento. Em consequência disto, por mostrar-se um meio 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 explorados foram o Beberibe, Cabo e Boa Viagem.

Costa et al. (1998) [3] e CONTECNICA (1998) [4] relataram que a contribuição de águas subterrâneas para o sistema de distribuição da COMPESA era de 1,6 m³/s, explorados por 110

poços no aquífero Beberibe ao norte da RMR. Logo após a seca de 1998/1999 novos poços foram perfurados, 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, centenas de poços particulares vêm sendo utilizados principalmente para abastecer edifícios residenciais, os quais bombeiam em média 5,0 m³/h.

Em um estudo recente, Costa et al. (2002) [5] 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, o que significa que as águas profundas têm sido bastante exploradas.

Em um outro estudo realizado pelo grupo de recursos hídricos da UFPE denominado GIAREC – Gerenciamento Integrado dos Aquíferos da Região Metropolitana do Recife [6], foi elaborado um sistema de informações de águas subterrâneas incluindo 2.368 poços, os quais serviram de base para este estudo. Assim como, os dados do projeto de Dinâmica e Evolução da Salinização Marinha nos Aquíferos da Região Metropolitana do Recife [7], [8], desenvolvido pelo Grupo de Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco.

Aquíferos costeiros são altamente sensíveis às mudanças de carga e de fluxo. A falta de gerenciamento ou o gerenciamento inadequado de um aquífero costeiro através da super-exploração, por exemplo, pode levar ao avanço da cunha salina e à destruição do aquífero como fonte de água doce. A questão da intrusão marinha em aquíferos costeiros afeta grande parte das cidades costeiras do mundo 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 [9], e gradativamente, à medida que avança o conhecimento geológico da região, são feitos novos estudos e prognósticos.

Com o presente trabalho objetivou-se, através da modelagem matemática, a análise da possibilidade de intrusão marinha nos aquíferos Boa Vigem e Cabo, considerando a super exploração pelo crescente número de poços perfurados, a impermeabilização do solo que reduz a recarga por infiltração de águas pluviais e a previsão de cenários futuros que ajudarão na definição de métodos e modelos gerenciais que visem à conservação de forma sustentável das águas subterrâneas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área estudada localiza-se na Região Metropolitana do Recife delimitada pelas coordenadas UTM 9098000 e 9115000 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. A temperatura média anual é de 25,5°C. O mês mais frio é agosto com uma média de 23,9°C e o mais quente é fevereiro com uma média de 26,2°C. A umidade relativa do ar média é em torno de 80%, com máximo de 85% em maio e mínimo de 73% em janeiro. A insolação média anual é em torno de 2.464 h com máximo de 266 h no mês de novembro e mínimo de 108 h no mês de agosto. 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.

Os sistemas de abastecimento da Região Metropolitana Recife, incluindo captação, adução, tratamento e distribuição, são operados pela COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento, que em seus principais sistemas tem capacidade para captar e tratar cerca de 9,8 m³/s de mananciais superficiais, embora nem sempre produza a capacidade máxima. Os sistemas e suas respectivas vazões são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Vazões produzidas nos principais sistemas da RMR

Sistema	População atendida (%)	Capacidade de produção (m ³ /s)	Vazão média produzida em abr/03 (m ³ /s)
Alto do Céu	10	1,0	1,0
Botafogo	17	2,2	1,5
Tapacurá	36	4,0	3,7
Gurjaú	9	1,0	0,7
Suape	6	1,6	0,6
Total	78	9,8	7,5

Fonte: COMPESA/APO/Data-base: Mai/03

Esta região, mostrada na figura 1, 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 sul do lineamento encontram-se os aquíferos Boa Viagem e Cabo, respectivamente superior e inferior, separados por uma camada semiconfinante formada pela porção basal do aquífero Boa Viagem constituída de argila, argila arenosa e areia argilosa [10]. As principais características de cada aquífero são mostradas na tabela 2.



Figura 1 - Localização da área estudada.

Tabela 2 - Principais características dos aquíferos estudados [3]

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 armazen. ou porosidade eficaz	Baixa a elevada	Regular
Vazões	Média a elevada (17 m ³ /h)	Inferiores a 10 m ³ /h
Vazões específicas	Elevada (4,5 m ³ /h.m em média)	Baixas (< 1 m ³ /h.m)

Por apresentar maior número de poços, maior exploração de água e estar junto à costa, foram escolhidos os bairros do Pina e Boa Viagem em Recife, além do bairro da Piedade em Jaboatão dos Guararapes como área objeto do estudo. Nesta área, em estudos anteriores, foram definidas com base na concentração de poços, seções perpendiculares à linha de costa, as quais através dos perfis geológicos fornecidos pelas empresas perfuradoras, tiveram sua geologia representada em cortes, mostrados na figura 2.

Analisando os dados do monitoramento da condutividade elétrica realizado pelo projeto de Dinâmica e Evolução da Salinização Marinha nos Aquíferos da Região Metropolitana do Recife [7], [8], desenvolvido pelo Grupo de Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, foi possível definir os pontos críticos da área monitorada onde os valores médios obtidos eram maiores que o valor usualmente aceitável de 0,7 mS/cm. Para este estudo foram escolhidas as seções A-A' e B-B' as quais encontram-se próximas aos pontos críticos identificados no monitoramento conforme visto na figura 3.

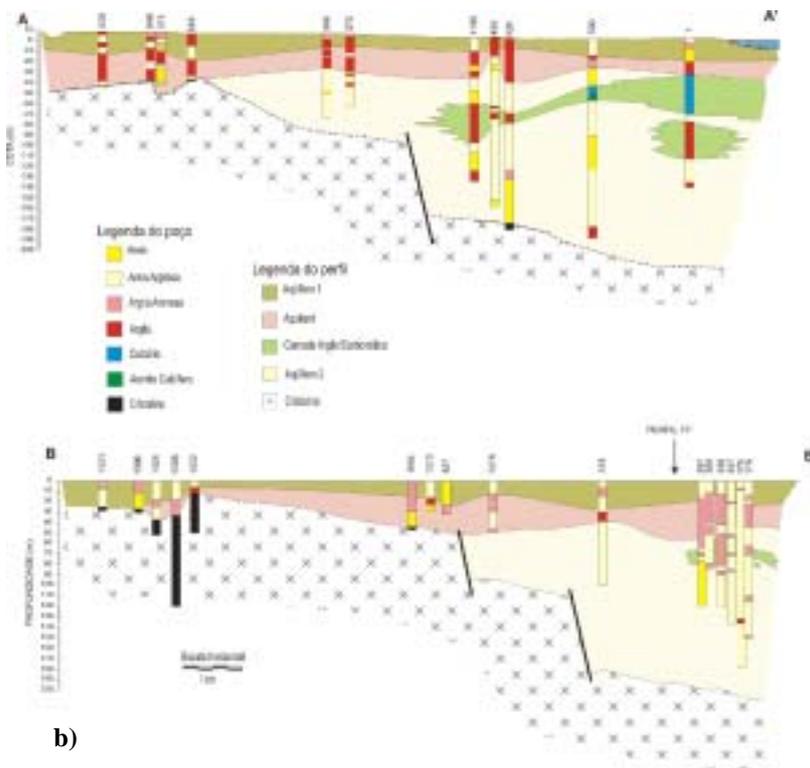
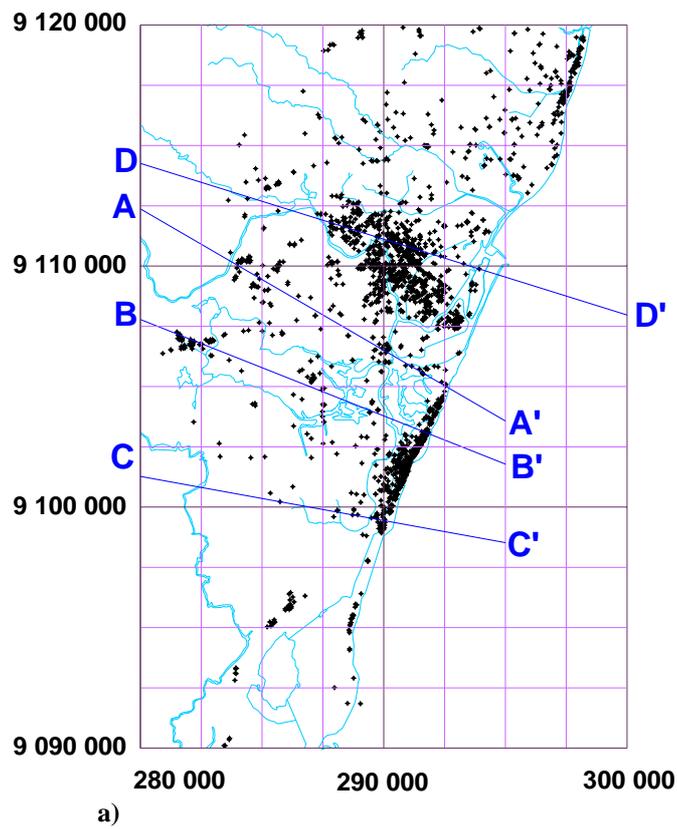


Figura 2 - a) Seções definidas em estudos anteriores (os pontos pretos representam poços cadastrados) ·b) Perfis das seções A-A' e B-B' definidos através de dados obtidos de poços cadastrados no GIAREC.

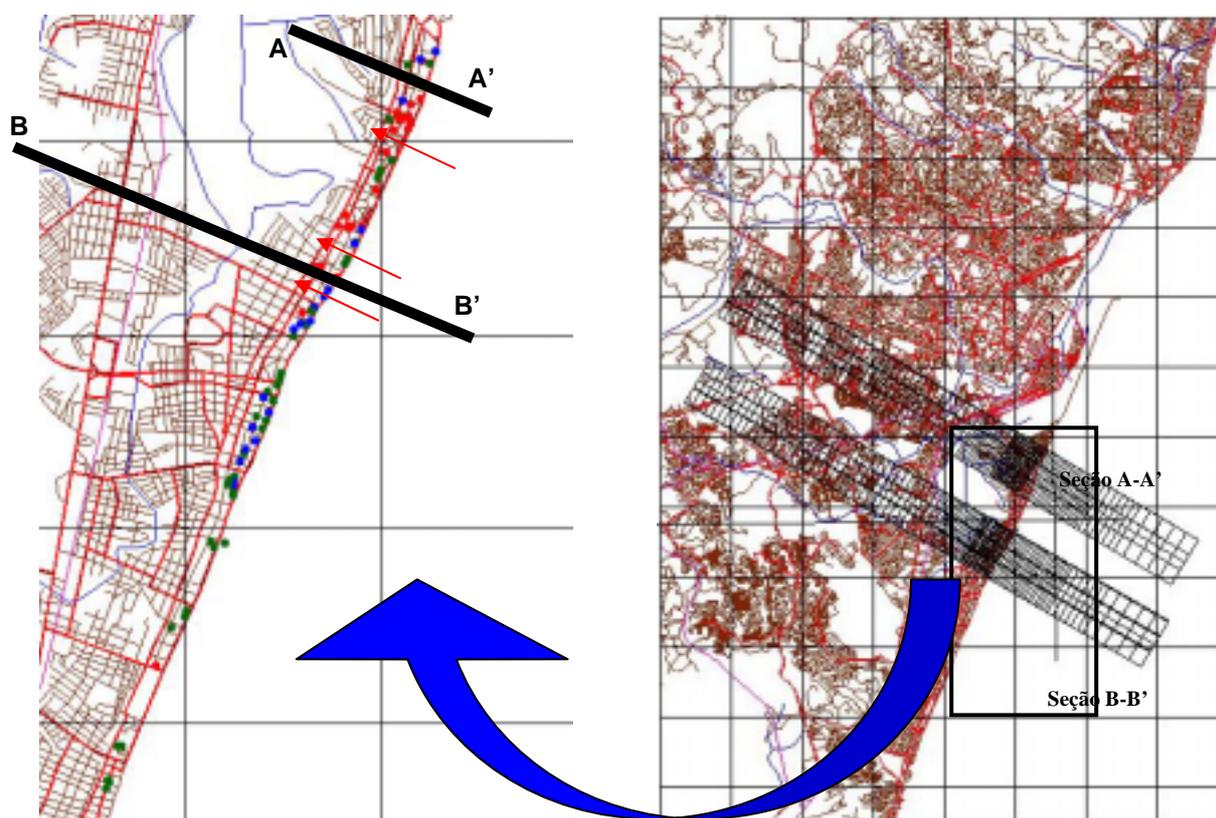


Figura 3 - Áreas críticas (os pontos em vermelho representam poços com valores médios de condutividade elétrica maiores que 0,7 mS/cm) e malha das seções A-A' e B-B'.

Modelo conceitual e modelo matemático

Para a modelagem computacional foi definido um modelo conceitual composto por malha de nós que abrange 15 Km sendo 5 Km no mar e 10 no continente. A malha possui três colunas de 500 m de largura e 100 linhas com dimensões variando de 50 a 500 m de distância (figura 3).

Para a seção A-A' foram utilizados como fonte para a definição da geometria da seção os valores de base e topo dos aquíferos, obtidos por Monteiro (2000) [10] (Figura 4). Para a seção B-B' foi utilizado o perfil geológico apresentado na figura 5.

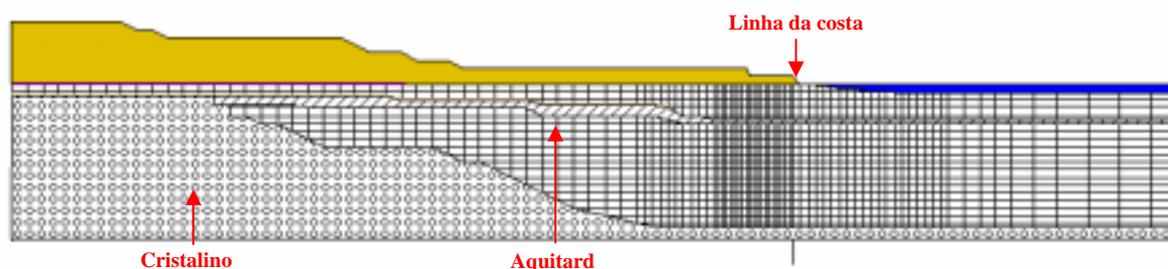


Figura 4 - Modelo conceitual da seção A-A', a hachura de bolas representa o cristalino e a hachura de linhas inclinadas o aquífero.

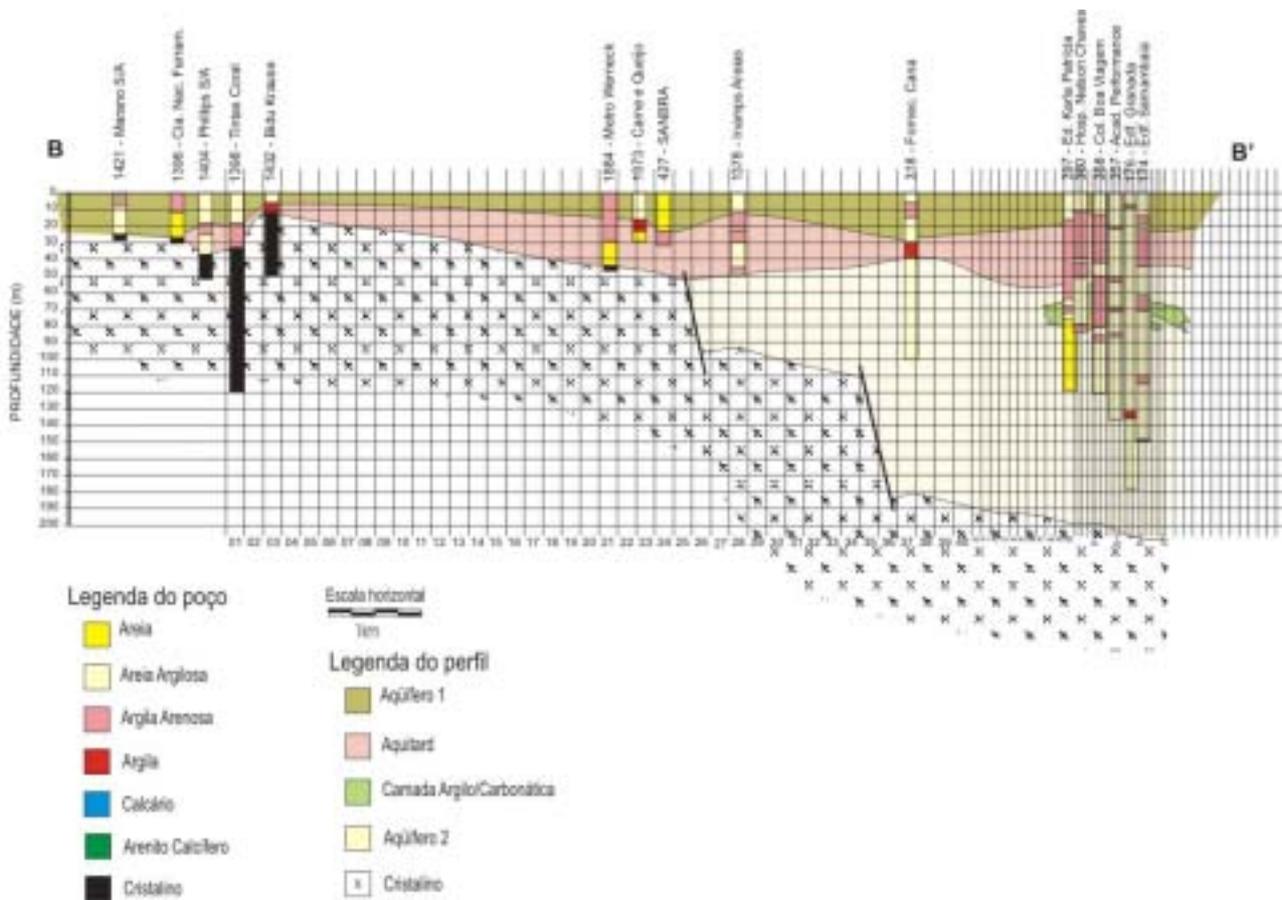


Figura 5 - Modelo conceitual da seção B-B'

Baseado no modelo conceitual composto pela malha de nós e os dados dos poços localizados na área em estudo, foi escolhido um modelo computacional adequado para gerar as simulações de cenários. O modelo escolhido foi o SHARP versão 1.1 de 10/05/99 desenvolvido pela USGS - United State Geological Survey. [11]

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 semi-confinantes [12].

Este programa requer todos os parâmetros típicos de entrada dos modelos de fluxo de águas subterrâneas. O conjunto de informações necessárias para especificar as condições iniciais depende do tipo de simulação. O modelo pode ser inicializado de duas maneiras: como uma nova simulação ou como continuação de uma simulação anterior. Existem duas opções para iniciar novas simulações: na primeira opção a carga hidráulica de água doce e a elevação da interface devem ser especificadas e são usadas para cálculo da carga hidráulica da água salgada; para a segunda opção, apenas as cargas iniciais são necessárias e a elevação da interface é calculada pelo programa. 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 os 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, a constante de fluxo pode ser especificada pela 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.

Os modelos conceituais para as duas seções (Figuras 4 e 5) foram definidos como sendo quasi-tridimensionais, que simula uma seqüência de aquíferos superpostos com intercalações de outras camadas semipermeáveis. Por estarmos estudando seções transversais, as células das colunas das extremidades são inativas, têm apenas a função de impedir a influência do fluxo lateral. Na região onde provavelmente está a interface, a malha é refinada por células de comprimentos menores. À leste a malha faz fronteira com o mar e ao oeste, o aquífero Cabo com o embasamento cristalino e o aquífero Boa Viagem com o aquífero Barreiras.

Como condições de contorno foram consideradas: para a base do sistema a condição de fluxo nulo, uma vez que a base do aquífero 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. Os dados de topo, base e potenciometria dos aquíferos, foram obtidos de estudos e pesquisas realizadas anteriormente [10]. Os valores dos principais parâmetros utilizados são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos principais parâmetros utilizados [10].

Definição	Unid.	Valores	
		B. Viagem	Cabo
Condut. Hidrául. de água doce na direção X	m/s	1,07E-03	1,00E-05
Condut. Hidrául. de água doce na direção Y.	m/s	1,07E-03	1,00E-05
Armazenamento específico de água doce deve ser negativo nos nós de carga constante.	m-1	1,00E-01	1,14E-06
Armazenamento específico de água salgada deve ser negativo nos nós de carga constante.	m-1	1,00E-01	1,14E-06
Porosidade	%	10	7

Obtenção de dados

Para a obtenção dos dados geológicos necessários à definição dos perfis estudados, foram utilizados os cadastros de poços de órgãos públicos como CPRH e SRH, assim como trabalhos realizados recentemente como o HIDROREC I [3], HIDROREC II [5] e o GIAREC [6].

Para os dados hidrodinâmicos, além das fontes já citadas foi consultada a base de dados do GRH-UFPE de projetos de pesquisa recentemente desenvolvidos ou em desenvolvimento.

Os poços obtidos no cadastro foram georreferenciados através da utilização do software Arc View da ESRI [13] e sobrepostos às malhas das seções A e B (Figura 6). Apenas os poços que coincidiam com a malha, além de outros próximos, foram selecionados e deram origem à tabela de dados principal (Figura 7). A esta tabela de dados foram adicionados todos os dados obtidos das várias fontes de consulta.

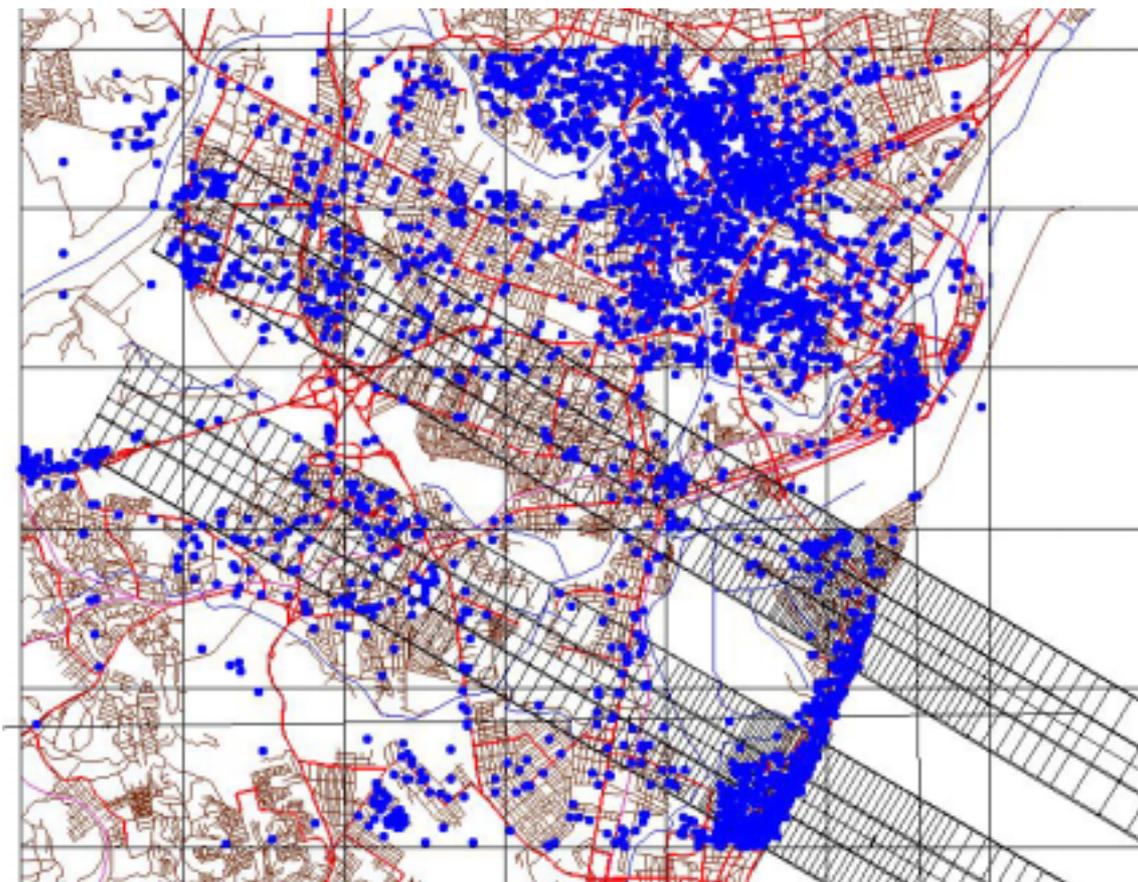


Figura 6 - Todos os poços obtidos.

Simulações

Como o modelo numérico fornecido pela USGS é compilado com número máximo de células da malha em 20 linhas, 25 colunas e 3 camadas, para que o modelo suportasse a malha definida no modelo conceitual com 100 linhas, foi necessário alterar o código fonte escrito na linguagem FORTRAN 77 e compilá-lo novamente. Também tornou-se necessário alterar o número máximo de iterações, uma vez que, na versão original apenas 200 iterações são permitidas. Como foram utilizados períodos de tempo de 1 mês e 1 semana entre cada iteração, em apenas 17 anos a simulação seria interrompida por exceder o número máximo.

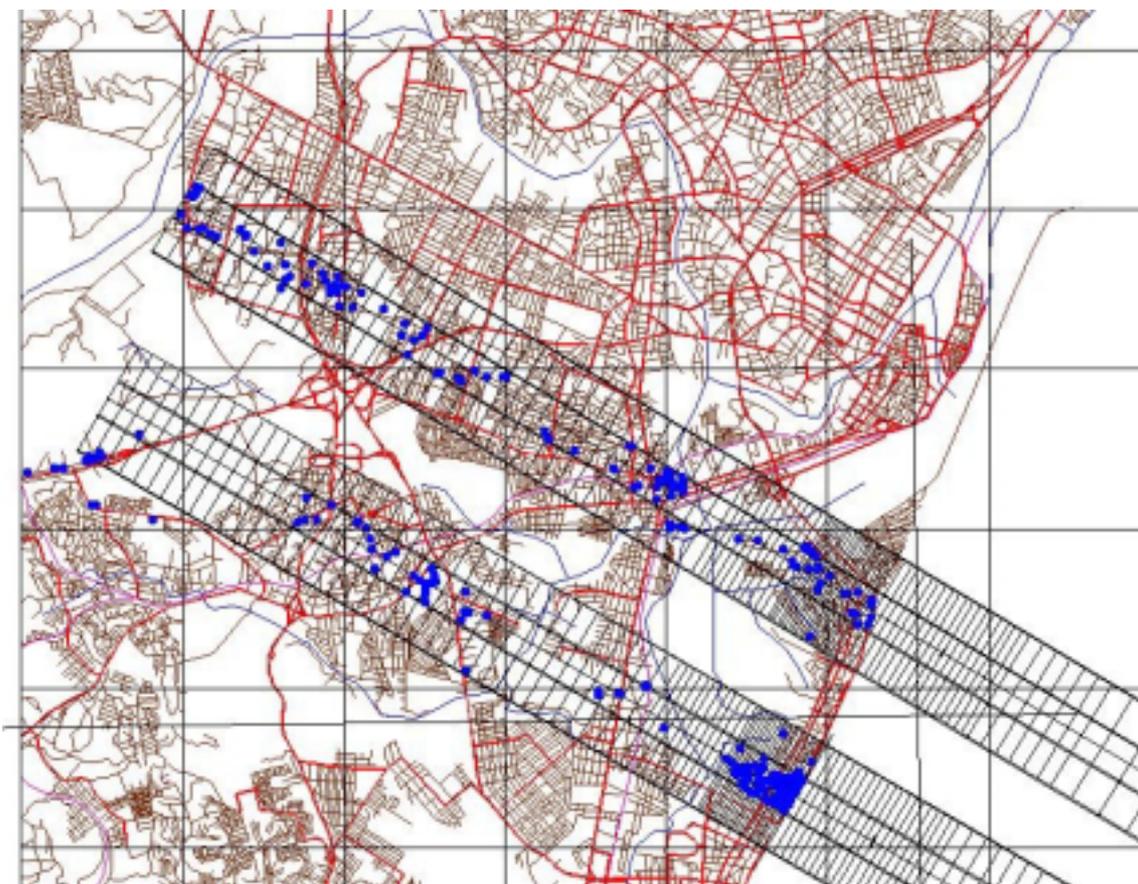


Figura 7 - Poços coincidentes com a malha das seções.

Com o objetivo de determinar a posição inicial da interface que existia anteriormente ao início da exploração dos aquíferos, foram realizadas simulações com vazões de bombeamento nulas. A geometria, condições de contorno, parâmetros hidrodinâmicos e potenciometria dos aquíferos foram baseadas no estudo de Monteiro (2000) [10].

Adotou-se a interface inicial em uma posição hipotética e executou-se o modelo computacional até atingir uma posição de equilíbrio. Para a recarga foram adotados os valores de 15 mm/mês e 30 mm/mês, respectivamente 7,5% e 15% da média pluviométrica mensal de 200 mm/mês. Nas figuras 8 e 9 são mostrados resultados de simulações com os valores de recarga adotados para a seção A-A'. Para a seção B-B' foi adotada uma recarga de 10 mm/mês.

Na figura 8, para a condição de recarga de 15 mm/mês, a linha verde representa a interface inicial hipotética, ou seja, escolhida aleatoriamente, a linha azul representa o cenário para 30 anos de simulação, a linha vermelha 50 anos, e a linha magenta representa a posição de equilíbrio encontrada pelo modelo computacional com 75 anos de simulação. Percebe-se que a posição estimada para o aquífero Cabo na seção A-A' foi muito próxima da encontrada no equilíbrio, já no aquífero Boa Viagem houve um movimento no sentido contrário ao continente, indicando que a interface inicial encontrava-se originalmente mais afastada da costa.

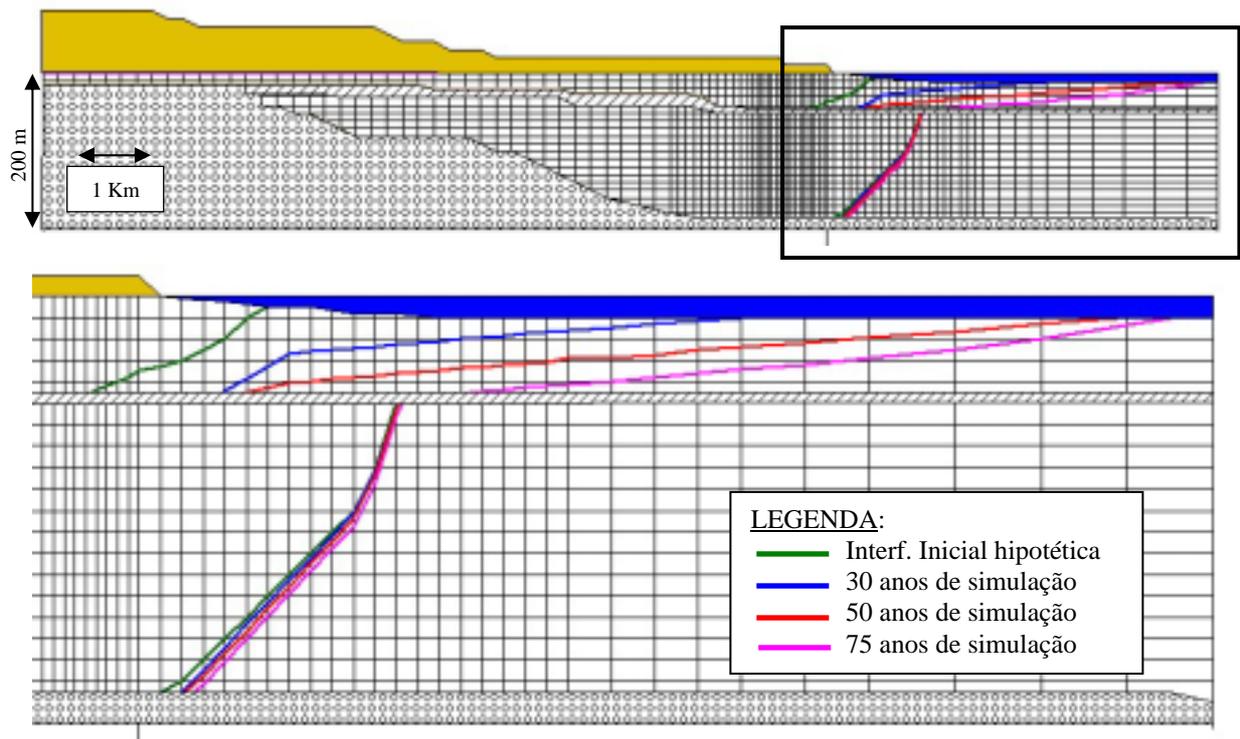


Figura 8 - Resultado da simulação da interface inicial de equilíbrio da seção A-A' para recarga de 15 mm/mês.

Na figura 9, para a condição de recarga de 30 mm/mês, a linha verde representa a interface inicial hipotética, ou seja, escolhida aleatoriamente, a linha azul representa o cenário para 30 anos de simulação, a linha vermelha 50 anos, e a linha magenta representa a posição de equilíbrio encontrada pelo modelo computacional com 96 anos de simulação.

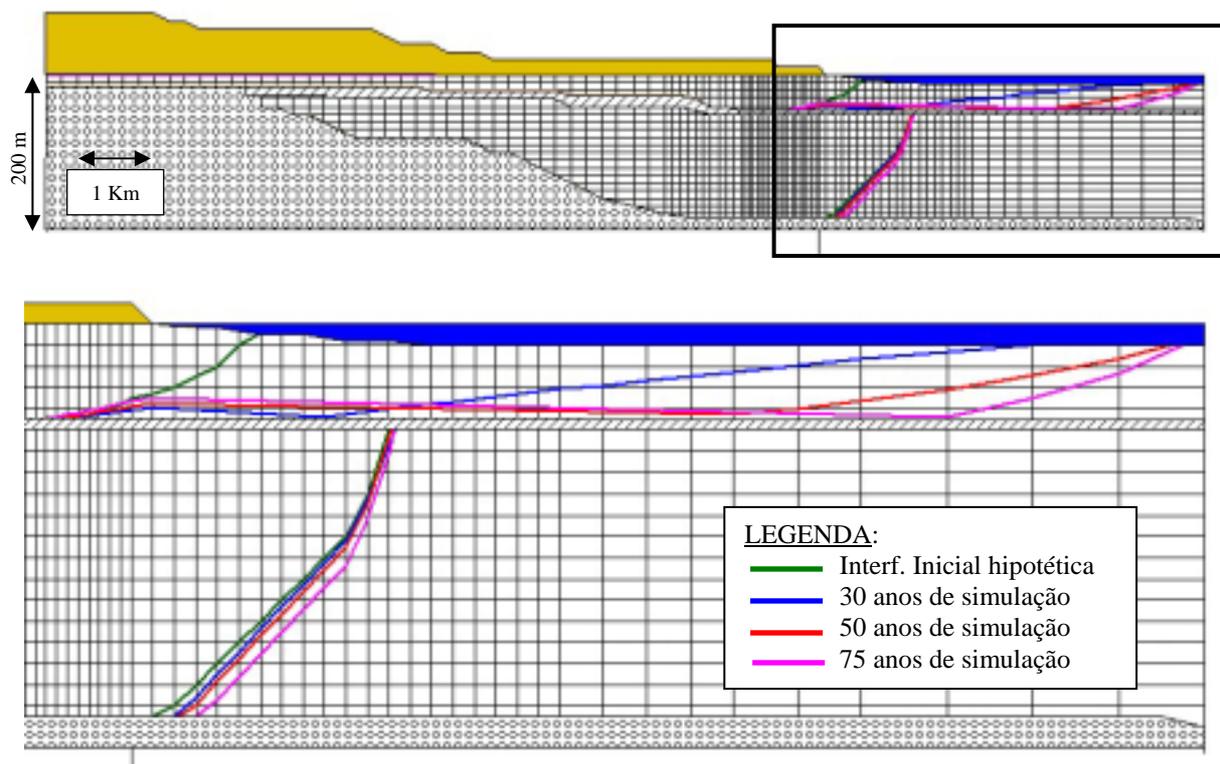


Figura 9 - Resultado da simulação da interface inicial de equilíbrio da seção A-A' para recarga de 30 mm/mês.

Percebe-se que para uma recarga maior, o avanço da interface no aquífero Boa Viagem ocorre com maior velocidade, porém o equilíbrio só é alcançado com 96 anos de simulação. A posição encontrada no equilíbrio é mais afastada da linha da costa, o que é coerente, pois, com maior recarga é maior a pressão da água doce e menor o avanço da cunha salina.

Para a seção B-B' foi assumida uma posição inicial hipotética (linha verde) e simulado o cenário sem bombeamento até o equilíbrio (linha azul) mostrado na figura 10.

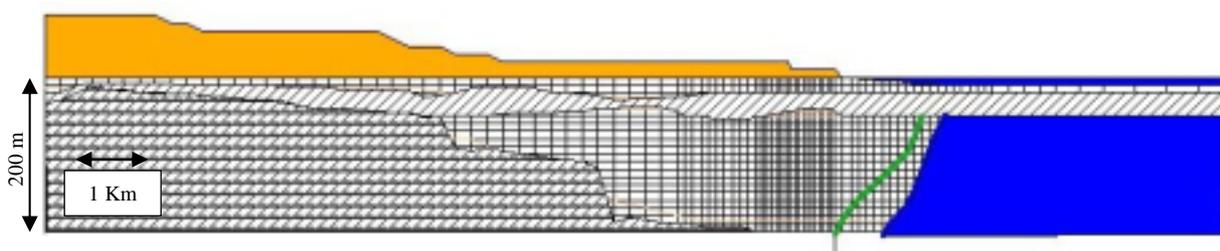


Figura 10 - Resultado da simulação da interface inicial de equilíbrio da seção B-B' para recarga de 10 mm/mês.

Com a suposta posição inicial definida, partiu-se então para a consideração de dados de bombeamento. As vazões de bombeamento para as duas seções foram inicialmente obtidas através dos poços cadastrados.

Para a seção A-A', devido a pouca informação sobre vazões, foi estimada uma vazão por célula, obtida pela suposição do número de quadras de ruas de cada célula, as quais possuíam um número de poços, que por sua vez extraíam uma vazão média de 5 m³/h e que somados representavam a vazão extraída daquela célula. A vazão por célula varia de acordo com o tamanho da célula, a região onde se encontra e a densidade populacional da área. Os valores foram somados e aplicados a cada 5 células.

Para a seção B-B' a estimativa de vazão por célula foi aplicada apenas no aquífero superior, pois, para o aquífero Cabo os dados de vazão foram considerados suficientes por apresentarem-se distribuídos em um maior número de células. Nas tabelas 4 e 5 a seguir são mostrados os dados de bombeamento para as seções A e B.

Tabela 4 - Dados de bombeamento para a seção A-A'.

Célula	Aquífero	Vazão m³/h	Topo filtro	Base filtro	Tipo de dato
05	Boa Viagem	50	10	15	Estimado
10	Boa Viagem	50	10	15	Estimado
15	Boa Viagem	50	10	15	Estimado
20	Boa Viagem	50	10	15	Estimado
25	Boa Viagem	50	15	20	Estimado
30	Boa Viagem	50	15	20	Estimado
35	Boa Viagem	50	20	25	Estimado
40	Boa Viagem	50	20	25	Estimado
45	Boa Viagem	50	30	35	Estimado
50	Boa Viagem	50	35	45	Estimado
55	Boa Viagem	50	35	45	Estimado
60	Boa Viagem	50	35	45	Estimado
65	Boa Viagem	50	35	45	Estimado
05	Boa Viagem	14,29	40	50	Cadastro
06	Boa Viagem	2,55	40	50	Cadastro
08	Boa Viagem	7,12	35	42	Cadastro
19	Cabo	0,18	75	80	Cadastro
19	Boa Viagem	0,18	30	35	Cadastro
27	Cabo	0,32	125	133	Cadastro
27	Boa Viagem	0,32	30	38	Cadastro
33	Cabo	0,5	140	147	Cadastro
34	Cabo	0,36	130	139	Cadastro
35	Cabo	1,62	140	147	Cadastro
36	Boa Viagem	0,036	5	6	Cadastro
36	Cabo	0,97	140	152	Cadastro
37	Cabo	1,26	140	152	Cadastro
43	Cabo	0,46	180	185	Cadastro
46	Cabo	0,65	180	187	Cadastro
49	Cabo	0,97	135	143	Cadastro
63	Cabo	2,05	180	186	Cadastro
69	Cabo	0,21	135	143	Cadastro

Tabela 5 - Dados de bombeamento para a seção B-B'.

Célula	Aquífero	Vazão m ³ /h	Topo filtro	Base filtro	Tipo de dado
01	Boa Viagem	16	30	40	Cadastro
03	Boa Viagem	5,1	30	40	Cadastro
16	Boa Viagem	16	70	80	Cadastro
21	Boa Viagem	12	30	60	Cadastro
22	Boa Viagem	2,64	20	29	Cadastro
23	Boa Viagem	54,5	30	35	Cadastro
24	Boa Viagem	46	30	37	Cadastro
28	Boa Viagem	05	10	19	Cadastro
36	Cabo	25	105	140	Cadastro
37	Cabo	11	100	110	Cadastro
51	Cabo	3,6	130	146	Cadastro
54	Cabo	7,6	110	121	Cadastro
55	Cabo	4,8	120	133	Cadastro
57	Cabo	5,6	115	126	Cadastro
59	Cabo	2,5	130	140	Cadastro
60	Cabo	11,5	120	160	Cadastro
60	Boa Viagem	20	15	20	Estimado
62	Cabo	5,46	115	125	Cadastro
63	Cabo	10	135	160	Cadastro
64	Cabo	1,3	150	162	Cadastro
65	Boa Viagem	20	15	20	Estimado
66	Cabo	05	150	175	Cadastro
67	Cabo	27	120	150	Cadastro
68	Cabo	15	120	160	Cadastro
69	Cabo	22	130	170	Cadastro
70	Boa Viagem	20	15	20	Estimado
70	Cabo	30	120	170	Cadastro
50	Cabo	30	120	170	Cadastro
60	Cabo	30	120	170	Cadastro
65	Cabo	30	120	170	Cadastro
70	Cabo	30	120	170	Cadastro

Resultados seção A-A'

Com os dados de bombeamento foram simulados cenários para 10, 20 e 50 anos de bombeamento. Verificou-se que para esta seção, o avanço da cunha salina ocorreu com taxas diferentes em cada aquífero, sendo o avanço maior no aquífero superior. Observa-se ainda que para o tempo mais longo a interface no aquífero Boa Viagem sofre uma elevação excessiva devido ao bombeamento.

Nas figuras 11 e 12, a linha magenta representa a posição de equilíbrio encontrada pelo modelo computacional, a linha verde representa o cenário para 10 anos com bombeamento constante, a linha azul representa o cenário para 20 anos e a linha vermelha 50 anos.

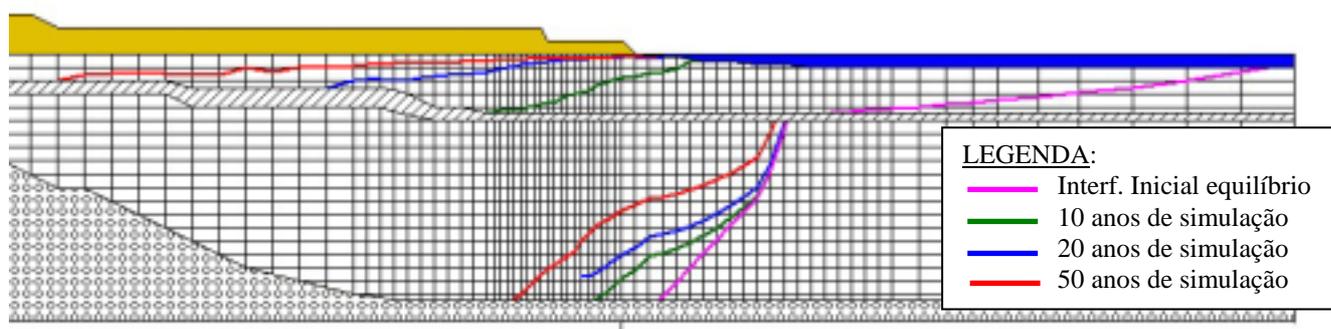


Figura 11 - Simulação de cenários para 10, 20 e 50 anos de bombeamento com recarga de 15 mm/mês.

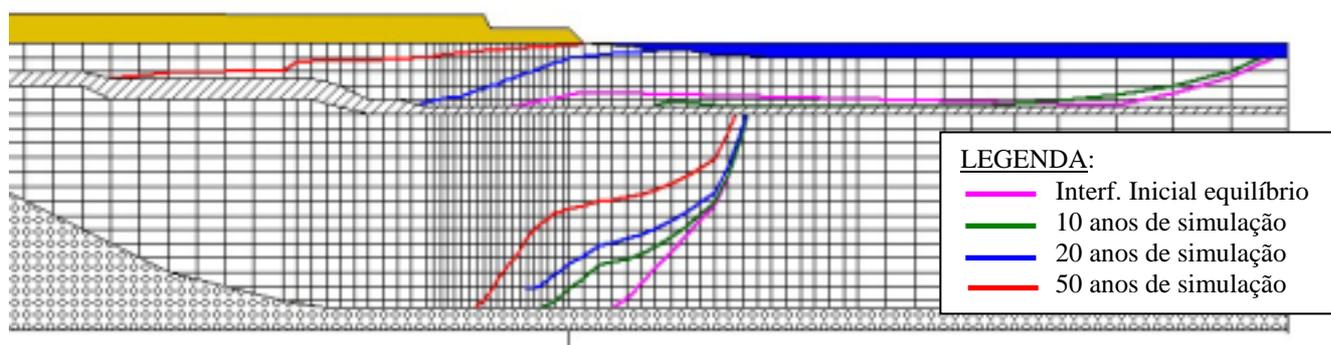


Figura 12 - Simulação de cenários para 10, 20 e 50 anos de bombeamento com recarga de 30 mm/mês.

Considerando a recarga de 30 mm/mês observa-se que para o cenário simulado com recarga maior, há uma forte diferença de comportamento nos primeiros 10 anos para o aquífero livre. Já a partir dos 20 anos os cenários não diferem muito. No aquífero confinado ocorre o inverso, nos primeiros 20 anos o comportamento em ambos é similar, porém com 50 anos a interface apresenta-se mais inclinada para o cenário com maior recarga.

Uma outra situação estudada foi a de realizar simulações com os mesmos parâmetros de bombeamento, porém considerando também a injeção de água nos aquíferos. Foram inseridos aos dados de bombeamento 4 poços com vazão negativa que representa injeção, todos com vazão de 50 m³/h. Dois poços, um na célula 50 com profundidade de 20 a 25m e outro na célula 55 com profundidade de 30 a 35 m, injetam água no aquífero Boa Viagem. Outros dois, um na célula 60 com profundidade de 150 a 155 e outro na célula 70 com profundidade de 160 a 165, injetam água no aquífero Cabo. No resultado da simulação, mostrado na figura 13, observa-se que houve um recuo da interface no aquífero Cabo, porém, no aquífero Boa Viagem a interface continuou avançando.

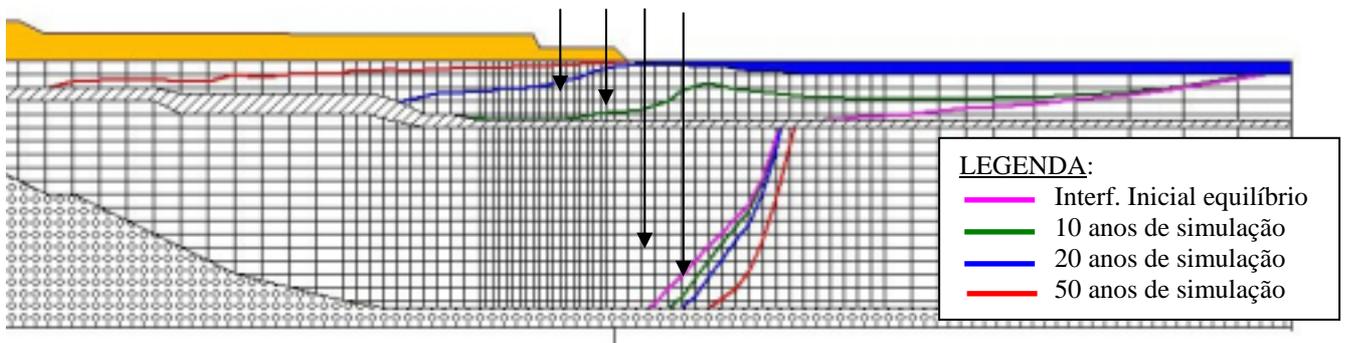


Figura 13 - Simulação de cenário para 10, 20 e 50 anos com recarga de 15 mm/mês e injeção de 50 m³/h em quatro poços indicados pelas setas.

Na figura 13, para um cenário com poços injetando água, a linha magenta representa a posição de equilíbrio encontrada pelo modelo computacional, a linha verde representa o cenário para 10 anos com bombeamento constante, a linha azul representa o cenário para 20 anos e a linha vermelha 50 anos.

Resultados seção B-B'

Foram simulados cenários para 10, 30 e 50 anos de bombeamento. Verificou-se que para esta seção o aquífero Boa Viagem não sofreu alterações significativas na posição da interface de equilíbrio encontrada. Portanto as simulações realizadas focaram o aquífero Cabo.

Na figura 14 a seguir, a linha azul representa a interface inicial, a linha laranja a interface após 10 anos de bombeamento, a linha magenta após 30 anos, a linha vermelha 50 anos e a linha preta 89 anos de bombeamento.

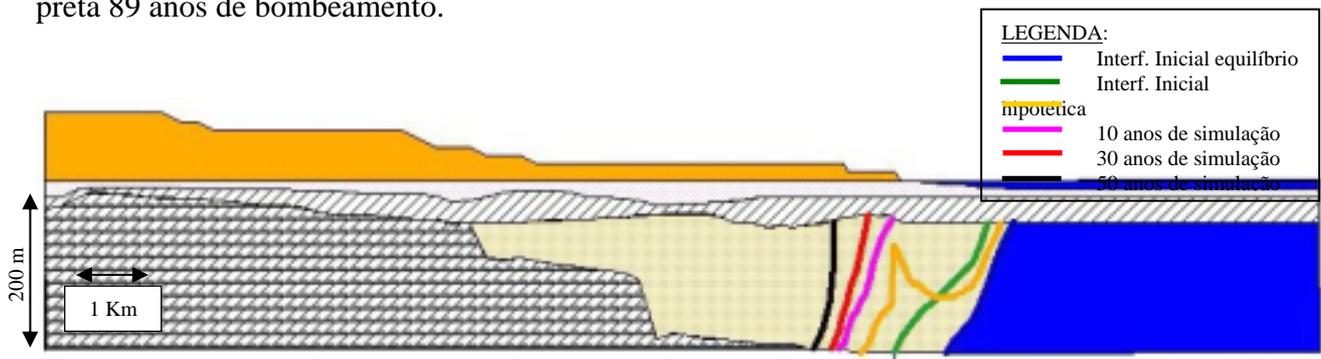


Figura 14 - Simulação de cenário para 10, 30, 50 e 89 anos com recarga de 10 mm/mês.

Pode-se considerar que o cenário de 30 anos possivelmente representa a situação atual deste aquífero, pois, o início da exploração se deu por volta dos anos 70. Com este cenário já estariam afetados alguns poços próximos à linha da costa. Um mapa de valores de condutividade elétrica de monitoramento recente (1999-2004) pode ser visto na figura 15 a seguir, onde os pontos verdes representam poços com valores entre 0 e 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, os pontos azuis valores entre 400 e 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e os pontos vermelhos valores acima de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que caracterizam poços salinizados.

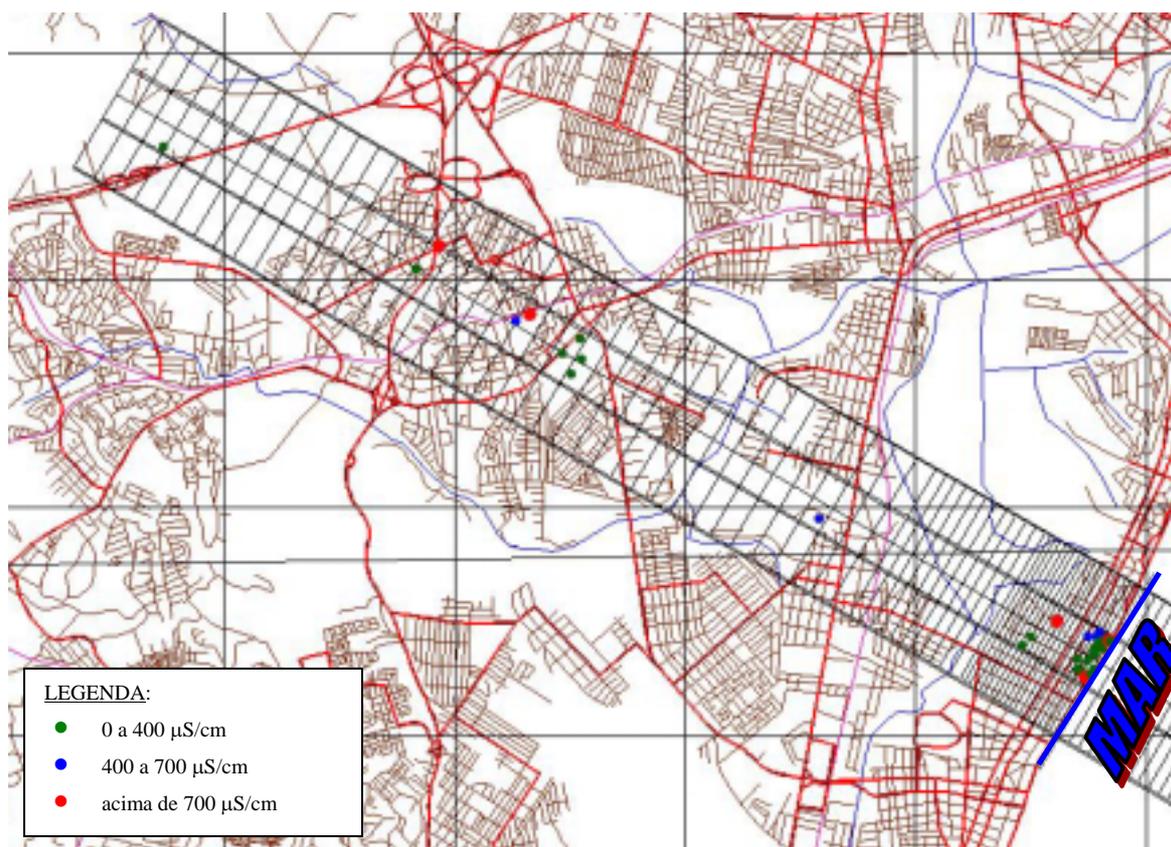


Figura 15 - Mapa de valores de condutividade elétrica

Observa-se que na região litorânea existem 3 pontos vermelhos que podem representar o avanço da cunha salina. Também são observados pontos vermelhos em áreas mais continentais que podem estar associados a poços contaminados por infiltração vertical de águas do aquífero superior, ou influenciados pela infiltração de rios que recebem influência da maré marinha.

Analisando uma forma de conter o avanço da cunha salina apresentado pela simulação anterior, foram realizadas novas simulações para os mesmos cenários de 10, 30 e 50 anos, aplicando-se poços de injeção de água doce.

Foram estudadas duas situações: quatro poços injetando no aquífero Cabo a vazão de 15 m³/h cada e os mesmos poços injetando a vazão de 30 m³/h cada. A localização dos poços são as células 70, 65, 60 e 50 e a profundidade de injeção de 120 a 170 metros.

Os resultados são mostrados nas figuras 16 e 17 a seguir. Na figura 16 as setas pretas representam a localização dos poços de injeção. O cenário apresentado é para a injeção de 15 m³/h por poço mais o bombeamento da tabela 5. Neste cenário a linha azul representa a interface inicial de equilíbrio, a linha laranja o cenário para 10 anos, a linha magenta o cenário para 30 anos e a linha vermelha o cenário para 38 anos, período em que se atingiu o equilíbrio.

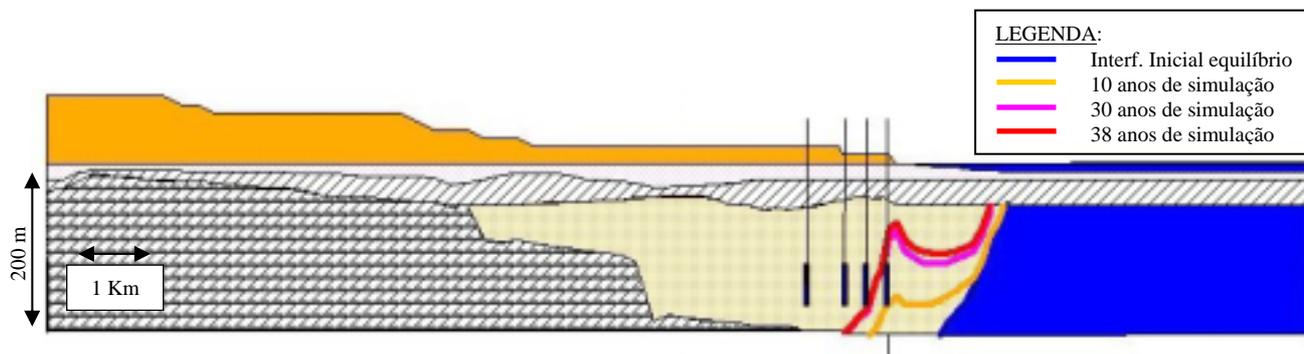


Figura 16 - Simulações com bombeamento para 10, 30 e 38 anos e injeção de 15 m³/h.

Na figura 17 as setas pretas representam a localização dos poços de injeção. O cenário apresentado é para a injeção de 30 m³/h por poço mais o bombeamento da tabela 5. Neste cenário a linha azul representa a interface inicial de equilíbrio, a linha laranja o cenário para 10 anos, a linha magenta o cenário para 13 anos, período em que a interface atingiu o equilíbrio.

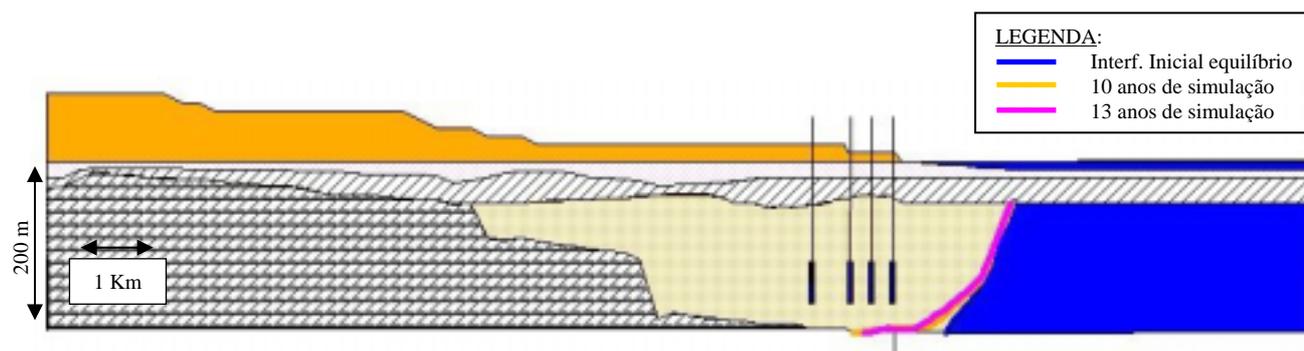


Figura 17 - Simulações com bombeamento para 10 e 13 anos e injeção de 15 m³/h.

Pode-se observar que com os resultados apresentados, a injeção de água no aquífero pode representar uma ferramenta para conter o avanço da cunha salina e evitar futuros problemas de déficit no abastecimento complementar em Recife.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos devem ser entendidos como estimativas de comportamento da interface, visto que há necessidade de um melhor conhecimento da camada semi-confinante para extrair informações mais precisas do ponto de vista quantitativo.

Pode-se afirmar que as atuais taxas de bombeamento estão muito elevadas e a interface salina tende a avançar gradativamente em direção ao continente. O monitoramento de algumas dezenas de poços, que vem sendo feito em pesquisa realizada na UFPE, indica a salinização de alguns poços,

embora a salinização não seja generalizada, o que vem provocando a hipótese de não ocorrência de intrusão salina, mas sim salinização por camadas superiores ou pela presença de paleomangues.

Não se pode afirmar que o avanço da cunha é a causa da salinização dos poços, mas o risco existe. Novas simulações devem ser realizadas analisando a sensibilidade do modelo à recarga por águas pluviais, bem como a influência da camada semi-confinante entre os aquíferos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o PADCT/FINEP e CT-HIDRO/CNPq pelo financiamento da coleta de dados de campo e à Veronilton Farias da CPRH – Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos o qual possibilitou a consulta ao cadastro daquela instituição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FEITOSA, F. e MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. CPRM. 2ª Edição, 2000.
- [2] IBGE. Censo Demográfico. 2000.
- [3] COSTA, W.; MANOEL FILHO, J.; SANTOS A. C.; BRITO, A. M.; SOUZA, F. J.; LOPES, A. V.; SANTOS A. J. Estudo Hidrogeológico da Região Metropolitana do Recife. UFPE/FADE, IRDC. 1998.
- [4] CONTECNICA. Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica, Volume 7 – Disponibilidade e Situação de Mananciais para abastecimento da RMR. Recife, PE, 1998.
- [5] COSTA, W. D. Estudo Hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes – HIDROREC II. Governo do Estado de Pernambuco. Secretaria de Recursos Hídricos. 2002.
- [6] CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M.; DEMÉTRIO, J. G. A. e MONTENEGRO, S. M. G. L. A groundwater information systema for Recife Metropolitan Region, In Management Information System, edited by C. A. Bubbia and P. Pascolo, WIT Press, Southampton, 2000.
- [7] 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. Dinâmica da salinização do aquífero Cabo na Região Metropolitana do Recife. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Fortaleza, CE, 2000.
- [8] 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.

Groundwater salinity in the Cabo Aquifer in Recife Coastal Plain, Pernambuco, Brazil. XXXII IAH & ALHSUD Congress – Groundwater and Human Development. Mar Del Plata, Argentina. CD-ROM. 2002.

- [9] ACQUAPLAN estudos e projetos ltda. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Região Metropolitana do Recife. Volume III – Recursos Hídricos Subterrâneos. 1979.
- [10] MONTEIRO, A.B. Modelagem de Fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície do Recife seus encaixes, Dissertação de Mestrado UFPE, 2000.
- [11] USGS. United State Geological Survey. <http://water.usgs.gov/software/sharp.html>. Internet. 20/06/04.
- [12] ESSAID, H. I. 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, 1990.
- [13] www.esri.com. Internet. 22/06/04.