

MODELAGEM MATEMÁTICA DO AQUÍFERO COSTEIRO DE CAMBOINHAS

Elson. A. do Nascimento¹ e Flávio. C. B. Mascarenhas²

Resumo - A presente pesquisa teve como objetivo simular, através de um modelo numérico, o comportamento do aquífero costeiro de Cambinhas, situado no município de Niterói/RJ, visando avaliar o risco de intrusão salina e a consequente contaminação dos poços residenciais, que representam uma importante fonte água para o abastecimento na região. A aquisição dos dados e a caracterização física da área modelada, contou com a participação de pesquisadores da Resub-Rede de Geotecnologia em Águas Subterrâneas/UFF e do DRM-Departamento de Recursos Minerais, órgão vinculado à Secretaria de Estado de Meio Ambiente, além de dados de fontes secundárias e informações de colaboradores locais. Foram realizadas várias simulações para diferentes condições de *stress*, recargas e extrações, impostas ao aquífero ao longo do tempo. Os resultados indicam que mantidas as condições atuais de extração e recarga, há tendência do rebaixamento do nível médio do lençol freático, para cotas inferiores as do nível do mar, representando risco eminente da ocorrência de intrusão salina, no aquífero. Como medida mitigadora, sugere-se a preservação de pontos de recarga do lençól, além da redução das taxas de extração de água dos poços, nos períodos críticos.

Abstract – The present research is related to the simulation, through a numerical model, of the coastal aquifer of Cambinhas, located in the State of Rio de Janeiro, in order to evaluate the risk of saline intrusion and the groundwater contamination. It was developed many simulations based on different stress conditions. The result shows that groundwater salinization may be faced due to the drawdown of the watertable, as long as, the present recharge and the extraction rates are kept the same. It is suggested to preserve and increase the recharge areas and to reduce the extraction in critical periods in order prevent the excessive drawdown of the watertable.

Palavras-Chave – Modelagem, aquífero, Cambinhas

¹ Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense – Rua Passo da Pátria, 156 sala 465 – São Domingos – Niterói/RJ – CEP: 24120.240 - E-mail: elsonn@nitnet.com.br – Tel: 021-6272951

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – COPPE/UFRRJ – Ilha do Fundão – Cidade Universitária - Rio de Janeiro/RJ – Tel: 021-5907701 ramal 39

INTRODUÇÃO

Camboinhas localiza-se na chamada região oceânica do município de Niterói, vizinho aos municípios de Itaipu e Piratininga. A região do aquífero apresenta solo arenoso constituído por sedimentos marinhos, lacustres, eólicos e fluviais, com topografia suave delimitada, por montanhas rochosas, pela lagoa de Itaipu e pelo oceano Atlântico. Da mesma forma que seus vizinhos, Camboinhas foi habitado por comunidades indígenas praticantes da pesca. Somente nos últimos anos, motivado pela beleza das praias e pela busca de residências fora da agitação dos grandes centros urbanos, o bairro vem experimentando um crescimento abrupto. Inúmeras famílias, sobretudo de classe média alta, tem construído casas de veraneio e de moradia permanente em um ritmo acelerado sem que, contudo, o poder público tenha acompanhado com as necessárias obras de infraestrutura, notadamente, redes de água e de esgoto. Seus moradores organizaram-se com o objetivo de resguardar os equipamentos e serviços locais, inclusive, criando a SOPRECAM – Sociedade Pró-Preservação Urbanística e Ecológica de Camboinhas, através da qual tomaram para si a tarefa de gerenciamento do bairro. Desta forma, os proprietários tem solucionado, por exemplo, o abastecimento de água com a utilização do aquífero subterrâneo, através da construção de poços tubulares rasos nas próprias residências e de poços tubulares profundos localizados em condomínios e em pontos estratégicos do bairro. Embora, estas medidas estejam, no momento, atendendo à demanda do consumo de água, tem-se observado, através de depoimentos de técnicos e moradores locais, que ao longo dos anos tem havido um rebaixamento gradativo do nível médio de água nos poços rasos, chegando até mesmo à exaustão completa ou secamento nos períodos críticos. Outro aspecto relevante, é que a água dos poços rasos é em geral de boa qualidade, sendo, em alguns casos, consumida diretamente pelos moradores sem nenhum tratamento prévio. Por outro lado, a continuidade do rebaixamento excessivo do nível médio do lençol freático poderá provocar a intrusão salina comprometendo a qualidade da água dos poços. Merece destaque, também, o fato de que além do aumento do consumo, a crescente impermeabilização do solo provocada pela construção de casas e pelo calçamento de ruas tem reduzido de maneira significativa os pontos de recarga do aquífero freático.

Para melhor avaliar estes impactos o presente estudo procura, através da simulação numérica, representar o comportamento do aquífero costeiro de Camboinhas frente as diferentes condições de *stress*, recargas e extrações do lençol freático, identificando, inclusive, o possível deslocamento ao longo do tempo da linha de interface água doce/água salgada.

O modelos matemático e computacional para a região foram concebidos com base no SGMP-Standard Groundwater Model Package (BOONSTRA & RIDDER, 1981), a partir da mudança da linguagem de programação para o Pascal - o programa original foi desenvolvido em Fortran -, da introdução de novos arquivos para entrada de dados e da alteração do método de resolução do sistema de matrizes (MASCARENHAS & NASCIMENTO, 1997).

Para a obtenção dos parâmetros hidrogeológicos, utilizou-se de fontes secundárias, medições de campo e informações disponíveis no local, processadas através do GWW-Groundwater Software for Windows (UNITED NATIONS, 1996).

IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS

Para a caracterização topográfica da área, utilizou-se de plantas da FUNDREN, obtidas na Prefeitura Municipal de Niterói, em escala 1:5000, apresentando curvas de nível com intervalos de 1 metro. Obteve-se, também, a planta do loteamento de Camboinhas em escala 1:2000 apresentando as coordenadas geográficas em UTM. Após a compatibilização das cartas, foram feitas medições no campo com nível ótico para atualização e complementação das cotas, a partir do RN local.

Este material foi utilizado, também, para a discretização espacial da área e para na identificação das condições de contorno. A área do aquífero é delimitada ao Sul por uma cadeia de montanhas rochosas que partem do interior e se estendem até junto ao mar. Ao Leste, é delimitada pelo oceano Atlântico, praia de Camboinhas, e ao Norte pelo canal Camboatá, que faz a conexão da lagoa de Piratininga e a de Itaipu. Em função das informações que se pode obter sobre as características geofísicas e hidrológicas do aquífero foram assumidas para fins da modelagem as condições de contorno descritas a seguir.

Condições de contorno – Área de encosta - esta região, conforme já comentado é constituída pelo conjunto de montanhas que circunda o aquífero. Isto pressupõe, evidentemente, a possibilidade de existência de *contorno de fluxo-controlado* contribuindo para o interior do aquífero. Entretanto, devido à dificuldade de se identificar e quantificar estes montantes e, considerando-se ainda, que no caso de aquífero não-confinado a recarga em função das precipitações sobre a área podem apresentar ordem de grandeza muito superior a de eventuais contribuições subterrâneas de encosta, então, optou-se por desprezar os fluxos oriundos deste tipo de formação. Portanto, a condição de contorno nestes pontos representados pelo nós de número 26 a 31 da malha discretizada (Figura I) foi assumida como de *potencial controlado*, significando nível constante para os poços situados nestas posições (Tabela I). Evidentemente, esta decisão agrega um erro ao modelo cuja magnitude só poderá ser definida a partir de melhor caracterização física desta região do aquífero. Ressalta-se, ainda, pelas razões apresentadas anteriormente, que esta diferença não deverá ser significativa no balanço hídrico total.

Canal Camboatá – por conectar-se com a lagoa de Itaipu que, por sua vez, encontra-se próximo ao mar, este canal apresenta a variação do nível d'água em função do comportamento das marés, como é próprio desse tipo de estrutura costeira. Como os gradientes hidráulicos entre os níveis de água no canal e os níveis do lençol freático nestes limites do aquífero são pequenos, parece razoável, para simplificar o problema, considerar-se esta fronteira, também, como de *potencial-controlado*, ou seja, assumindo-se como constantes os níveis de água nos poços desta região, cujos valores devem ser muito próximos aos dos níveis do canal e da lagoa. Este fato fica bastante evidenciado pela topografia praticamente plana do terreno nesta região. Nesta situação estão colocados os poços de contorno de número 35 a 38 da malha discretizada (Figura I), cujos valores estão na Tabela I.

Tabela I – Nível d'água nos poços³

Poços de Medição	Coordenada X (local)	Coordenada Y (local)	Nível d'água (1)
01	240	700	570.850
02	700	1020	570.250
03	980	1100	571.000
04	1100	1050	571.000
05	1230	930	571.000
06	1300	740	571.700
07	1440	550	572.700
08	1450	340	571.900
09	1530	110	574.000
10	1370	150	573.000
11	1260	550	572.800
12	1090	670	572.700
13	940	870	572.300
14	670	850	572.850
15	490	700	570.500
16	630	630	571.000
17	880	600	574.000
18	1280	360	570.750
19	1180	210	576.000
20	1000	440	575.300
21	890	230	570.500
22	780	320	570.500
23	510	370	570.300

³ a) Condições iniciais - nível do mar = 570 m

b) Nós internos de 1 a 25 e nós de contorno de 26 a 47

24	410	450	570.210
25	260	510	570.250
26	020	680	571.600
27	180	810	571.600
28	360	870	571.600
29	520	1020	571.600
30	670	1150	571.600
31	890	1270	571.600
32	1030	1170	571.600
33	1270	1050	571.600
34	1450	900	571.600
35	1550	720	570.700
36	1600	480	570.200
37	1650	200	570.200
38	1670	030	570.000
39	1400	030	571.400
40	1200	100	570.200
41	800	200	570.000
42	530	250	570.000
43	300	390	570.200
44	050	520	571.600
45	920	120	570.000
46	400	270	570.000
47	080	350	570.000

Camada impermeável – refere-se ao topo rochoso situado a aproximadamente 18 m da superfície do solo. A maioria dos poços rasos situam-se em torno de 12 a 17 m de profundidade, portanto, alcançam apenas a camada arenosa que é mais ou menos uniforme não atingindo a rocha. Somente os poços profundos, que alcançam até 80 m, ultrapassam este limite. Entre os técnicos que participaram dos trabalhos de campo, discutiu-se a possibilidade de existência de falhas geológicas ou outras formações que permitissem a ligação entre o aquífero freático e um aquífero confinado. Entretanto, a falta de evidências para esta suspeita conduziu a adotar-se o topo rochoso como o limite inferior do aquífero, sem recargas ou descargas profundas. Portanto, este é um *contorno de fluxo-zero*, isto é, não há contribuição de fluxo desta camada para dentro do aquífero, não havendo também fluxo no sentido contrário.

Praia de Camboinhas – esta é uma fronteira móvel do aquífero caracterizada pela interface água doce/água salgada, que devido a sua diferença de densidade acrescenta um

grau, ainda maior, de complexidade ao estudo do fluxo de água subterrânea. O posicionamento e a forma desta interface tem grande influência na qualidade da água do aquífero. Mesmo nos poços localizados nos quiosques, próximos à praia, a água constatou-se a presença de água de boa qualidade, ou seja, mostram-se própria para o uso doméstico. Vários fatores podem justificar esta situação, um deles é a predominância do fluxo subterrâneo no sentido do mar. Isto, pode ser deduzido pelo gradiente de potenciais hidráulicos que é acentuado em direção ao nível do mar, nesta região do aquífero (Figura II). Outro ponto que merece destaque, é o fato da água salgada apresentar maior densidade e, portanto, situar-se em maior profundidade do que a água doce, não sendo, por isso, captada pelas bombas instaladas nos quiosques. Embora, haja indicadores da existência de fluxos subterrâneos em direção à praia, eles não foram considerados para fins da presente modelagem. A razão é a mesma já apresentada para outros contornos, ou seja, estes volumes são muito pequenos quando comparados com as recargas e extrações devidas à chuva e ao bombeamento dos poços, respectivamente. Logo, esta fronteira é considerada de potencial constante de valor igual ao do nível do mar, ou seja, *contorno de potencial-controlado*.

Superfície livre – é a fronteira representada pelo limite superior do aquífero, ou seja, pelo lençol freático. É, também, classificada como fronteira móvel devido a sua característica transiente. O seu conhecimento ao longo do tempo é de fundamental importância para se avaliar as potencialidades de um aquífero, assim como, os riscos de degradação por contaminação de resíduos e por intrusão salina. É o principal contorno de recarga do aquífero, a partir da percolação da água da chuva e é, também, o principal contorno de extração, tendo em vista a existência de um número muito grande de poços dos quais a água é bombeada diariamente em grandes quantidades. As medições da superfície livre foram feitas a partir dos níveis d'água dos poços rasos que representaram, também, as *condições iniciais* do modelo. As medições foram desenvolvidas com sensor eletrônico desenvolvido especificamente para esta finalidade. Este aparelho é constituído de um circuito eletrônico que produz um sinal sonoro ou luminoso quando em contato com a água. Devido a dificuldade de acesso aos poços residenciais, as medições foram realizadas, preferencialmente, nas obras existentes. Primeiramente, obteve-se as profundidades dos níveis d'água em relação à boca do poço ou a superfície do solo e, em seguida, foi feito o referenciamento destas cotas ao nível do mar. A fim de evitar valores negativos e para manter a ordem de grandeza dos termos da equação já obtida no desenvolvimento do modelo (NASCIMENTO, MASCARENHAS & MANSUR, 1997), adotou-se o valor de 570 m para as cotas situadas ao nível do mar.

Outros parâmetros - Perfil geológico - foi obtido a partir de perfis de poços profundos existentes, perfurados por empresas privadas, incluindo os disponíveis na SOPRECAM e, também, os fornecidos por condomínios. Testes complementares com resistivímetro contribuíram para a interpretação do perfil. Com base nos dados disponíveis foi assumido para o aquífero uma camada de areia de textura média com espessura em torno de 18 m baseada por um topo rochoso considerado impermeável. A delimitação precisa

da superfície desta camada dependeria de levantamento mais detalhado, o que esteve fora dos recursos disponíveis para a presente pesquisa.

Coefficiente de armazenamento e condutividade hidráulica - A obtenção destes parâmetros, exige a utilização de equipamentos sofisticados e métodos complexos como o eletroresistivímetro e o teste de bombeamento, respectivamente. Devido a estas limitações assumiu-se valores para o coeficiente de armazenamento (μ) que variam entre 7% e 20% distribuídos na área com base na experiência dos técnicos que participaram dos trabalhos de campo. Para a condutividade hidráulica adotou-se a relação de HAZEN (CUSTÓDIO E LLAMAS, 1976) representada pela Equação 5.1, que baseia-se na granulometria do aquífero. Para isto, foram feitas análise granulométricas em vários pontos e, em seguida, extrapolou-se os dados para as demais células da malha discretizada.

$$K = 100x(d_{10})^2 \quad (01)$$

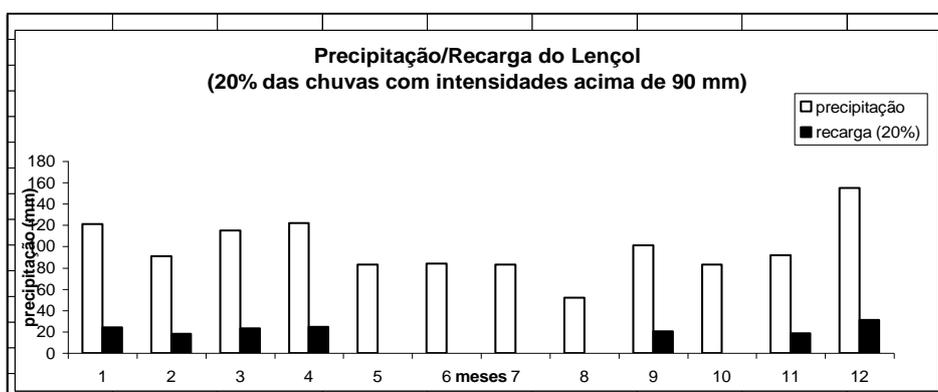
Onde,

K – condutividade hidráulica (cm/s)
d₁₀ –diâmetro da partícula (cm)

Recarga do lençol - O processo de infiltração de água no solo tem de ser visto por dois aspectos. O primeiro refere-se a água que é retida nos microporos e portanto está sujeita a voltar rapidamente à atmosfera por ação da evaporação direta do solo ou o pela transpiração das plantas em um processo conjunto denominado de evapotranspiração. O segundo aspecto representa a água que - uma vez atendida à demanda da camada de mais superficial do solo, também, chamada de zona de raiz ou zona não saturada -, percola e efetivamente atinge o lençol freático.

Poucos tem sido os estudos sobre fluxos de água subterrânea que tem feito a devida caracterização ou destinação destes dois processos, o que certamente tem conduzido a interpretações equivocadas na avaliações de volumes de água da chuva infiltrados para fins de recarga de aquíferos. CEDERSTROM (CEDERSTROM, 1964) com base em seus estudos na região Nordeste do Brasil destaca que é extremamente importante considerar que nas regiões áridas a necessidade de evapotranspiração é maior do que o volume de água precipitado pela chuva; concluindo quase não haver condições para o reabastecimento do reservatório subterrâneo, exceção feita apenas quando há ocorrência de chuvas que denominou de anormais como nos anos de 1934 e 1935, na localidade de Areia Branca. Por outro lado, ressalta o mesmo autor, que no Nordeste a maior parte da chuva cai em 3 ou 4 meses. Neste período, a chuva é muito mais abundante do que a requerida para a vegetação. Sendo assim, depois de satisfazer às necessidades da evapotranspiração, existe água suficiente para infiltrar ou percolar para camadas mais profundas, ou seja, para a zona de saturação.

A intensidade, a duração e a frequência das chuvas são fatores preponderantes na definição dos níveis de recarga do lençol freático. Chuvas muito intensas e de curta duração, por exemplo, podem causar pouca ou nenhuma infiltração profunda, caso ocorram após longo período de seca e, em condições de alta demanda evaporativa. Acrescente-se a isto, o fato de que em precipitações fortes os choques das partículas de água com o solo podem compactá-lo, favorecendo o escoamento superficial e reduzindo as condições de infiltração.



Quadro I – Recarga do lençol em função da chuvas intensas (adaptado de CAVALCANTI, 1996)

Na presente pesquisa, para a recarga do lençol tomou-se por base a curva de precipitação da região referente a média de 29 anos do posto pluviométrico da ilha Modesto (CAVALCANTI, 1996), assumindo-se como taxa de recarga o valor de 20% das chuvas com intensidade superior a 90 mm (Quadro I) uniformemente distribuída na área. Valor semelhante foi utilizado por BOONSTRA (BOONSTRA & RIDDER, 1981) em seus exercícios de modelagem. Citações bibliográficas tem indicado que este fator pode chegar a 30% para o caso de aquíferos arenosos.

Consumo de água - para avaliar as diferentes condições de *stress* a que pode ser submetido o aquífero foram adotados vários níveis de consumo de água per capta. Entretanto, a dificuldade em se chegar a um valor realístico do consumo foi muito grande. Primeiramente, porque a população de Cambinhas, como ocorre em várias localidades do litoral fluminense, notadamente, nas áreas de veraneio é altamente flutuante. Ou seja, no verão atingem taxas muito elevadas de ocupação, enquanto que nos outros períodos do ano chegam a valores dez vezes menor. Por informações colhidas na associação de moradores, SOPRECAM, soube-se que cerca de 800 famílias, com média de 5 pessoas cada, habitam regularmente a região. Dados da Prefeitura Municipal apontam para uma população

residente no bairro de 854 pessoas em 1991, com uma taxa de crescimento em torno de 14% ao ano (MIZUBUTI, 1991). Dados da FAO para países do terceiro mundo apontam para um consumo de água de 200 litros/habitante/dia. Informações locais indicam, ainda, consumo da ordem de 400 litros/habitante/dia. Sabendo-se que a água oriunda dos poços rasos nas residências de Cambinhas tem função complementar e considerando-se, também, a diversidade de informações com relação a população e ao consumo, optou-se por arbitrar valores que possibilitassem uma primeira análise da modelagem. Os valores adotados, inicialmente, foram uma população de 800 famílias com cinco membros, cada, que corresponderia a 4000 pessoas com um consumo médio de água de 200 litros/habitante/dia nos meses de Dezembro a Março e o consumo médio de água de 100 litros/habitante/dia nos meses de Abril à Novembro. Ponderando-se estas taxas de consumo pela área de abrangência de cada um dos poços da malha discretizada (Figura 1) chega-se, então, aos valores de consumo de água adotados para o modelo.

Discretização espacial - Os pontos da malha discretizada foram distribuídos espacialmente em forma de triângulo obedecendo o critério de Delauney (LEE, D. T. & B. J. SCHACTER, 1980) para a geração de redes irregulares triangularizadas (TSAI, 1993) a fim de delimitar a área de influência de cada poço com base na malha de Thiessen (Figura I). A posição de alguns pontos da malha coincide com a localização dos poços de observação adotando-se nestes casos, então, os níveis de água medidos. Para as situações em que não foi possível esta coincidência, os dados referentes ao nível de água foram extrapolados a partir de poços situados mais próximos do ponto referenciado.

COMPORTAMENTO DO AQÜÍFERO FRENTE AS DIFERENTES CONDIÇÕES DE STRESS (SIMULAÇÃO)

Adotando-se a recarga de 20% das chuvas intensas e a extração equivalente ao consumo de 200 litros/hab/dia no verão e 100 litros/habitante/dia nos demais meses e a chuva considerada uniforme em toda a área tem-se os seguintes dados de entrada no modelo:

Tabela II – Balanço hídrico (recarga/extração)

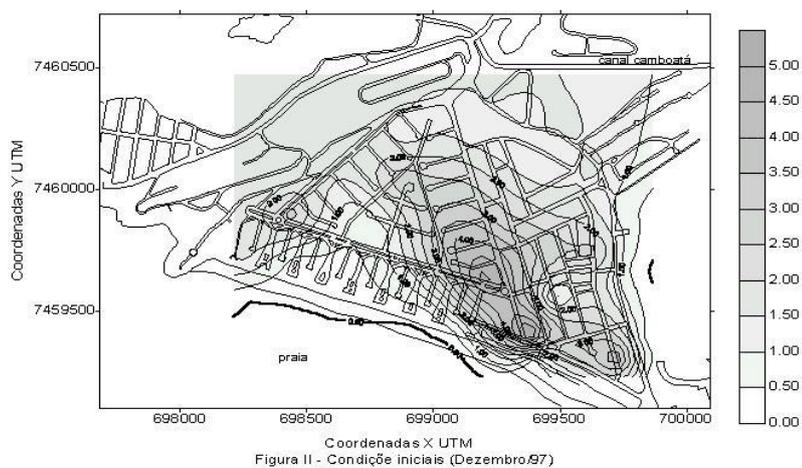
Meses	Recarga (mm)	Extração (mm)	Saldo (mm)
Janeiro	24	-24	00
Fevereiro	18	-24	-06
Março	23	-24	-01
Abril	24	-12	12
Maio	-	-12	-12
Junho	-	-12	-12
Julho	-	-12	-12
Agosto	-	-12	-12
Setembro	20	-12	08
Outubro	-	-12	-12
Novembro	18	-12	06
Dezembro	31	-24	07
T O T A L	158	-192	-34

Analisando-se o balanço apresentado na Tabela II, observa-se que as recargas efetivas do lençol ocorrem apenas em quatro meses, ou seja: abril, setembro, novembro e dezembro. Nos demais períodos a extração é maior do que a recarga, portanto, o saldo é negativo, contribuindo para uma redução anual da reserva de água subterrânea equivalente a 34 mm. Os efeitos destas alterações sobre o potencial hidráulico do solo foram simulados mensalmente para o período total de sessenta meses (5 anos) observando-se os impactos sobre as fronteiras móveis, em especial, sobre a interface água doce/água salgada, evidenciando-se o risco de intrusão salina. Inicialmente plotou-se o mapa potenciométrico das condições iniciais do aquífero referentes as medições realizadas no mês de Dezembro/97. Para facilitar a interpretação, as curvas potenciométricas foram superimpostas ao mapa do loteamento, conforme apresentado na Figura I.

Na Figura II, percebe-se que a linha de cota zero, em destaque, está situada na região da praia e, também, no lado limitado pela lagoa de Itaipu, lado direito da figura. Em ambos os casos e, sobretudo na região da praia, a superfície freática apresenta um gradiente bem definido, indicando predominância do fluxo do interior para fora do aquífero. Isto, parece justificar o fato de que mesmo nos poços localizados nos quiosques, que estão situados próximos à praia, a água apresenta-se doce, ou seja, sem percepção palatável da presença de sais.

Por outro lado, analisando-se apenas o limite da praia, percebe-se que o gradiente potenciométrico é muito mais acentuado na área mais a direita da praia – região em tonalidade mais intensa - , do que na região ao centro da praia, próximo a rua F (Figura II). Isto, equivale dizer que nos pontos de menor gradiente as velocidades do fluxo subterrâneo tendem a ser menores, considerando-se aquífero de textura uniforme. Provavelmente, neste local, ou seja, na região central da praia a interação água doce/água salgada poderá fazer com que por processo de difusão a água dos poços situados nestas

proximidades tenham maior vulnerabilidade ao risco de presença de sais oriundos da água do mar.



Cabe ressaltar ainda, que a variação da superfície do lençol freático, de maneira geral, apresenta sintonia com o comportamento topográfico da área, o que é considerado normal na disposição de aquíferos livres.

Como as variações mensais do saldo do balanço recarga/extração são muito pequenas e em alguns meses até nulas, optou-se por analisar inicialmente, a nível das

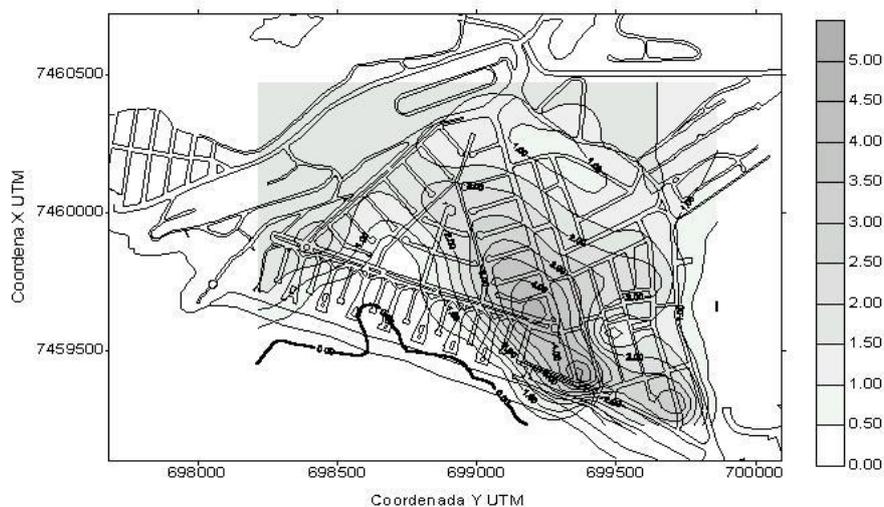


Figura III - Simulação para Dezembro/98

simulações, as alterações nas fronteiras livres nos meses de Dezembro de cada ano. Sendo assim, na plotagem correspondente aos resultados do modelo para Dezembro de 1998 (Figura III) percebe-se uma pequena movimentação da linha de cota zero na direção do interior do aquífero. Quando observa-se o comportamento da linha de cota 0,5 m, percebe-se esta movimentação de maneira mais acentuada, justamente na região de menor gradiente, indicando maior vulnerabilidade à intrusão salina. A forma da cunha salina poderia acrescentar importantes informações sobre os riscos de salinização, porém, dada a complexidade do assunto a presente pesquisa limitou-se, exclusivamente, ao estudo do comportamento dos potenciais. No mês de Dezembro/99 (Figura IV), observa-se uma acentuação na tendência de aproximação da linha de cota zero para o interior do aquífero como resposta à diminuição do potencial hidráulico no interior do aquífero. Evidentemente, este rebaixamento gradual do lençol freático é resultado da acumulação do déficit anual de 34 mm (Tabela II), conforme comentado anteriormente. Nas simulações correspondentes aos meses seguintes, além do avanço da linha de interface água doce/água salgada, percebe-se também um rebaixamento excessivo do lençol freático no lado correspondente à divisa com a lagoa de Itaipu. Na realidade, esta fronteira que corresponde aos nós de contorno de números 35, 36 e 37 (Figura I) foi assumida como de potencial-controlado de valores 0,70 m; 0,20 m e 0,20 m; respectivamente. Portanto, estes valores fixos impedem que a área adjacente a estes pontos assumam valores diferentes, à nível da modelagem. Entretanto, deve-se ressaltar

que o prolongamento desta área na direção da lagoa de Itaipu, lado direito da figura, possui topografia plana e é limitada pelas margens do canal. Logo, esta área poderá sofrer alteração no sentido do fluxo subterrâneo constituindo-se, também, em zona de risco de contaminação das água do lençol freático.

Os aspectos até aqui discutidos, vão tornando-se cada vez mais evidentes na medida em que o processo avança no tempo conforme pode ser observado nas Figura V, representando Dezembro de 2002.

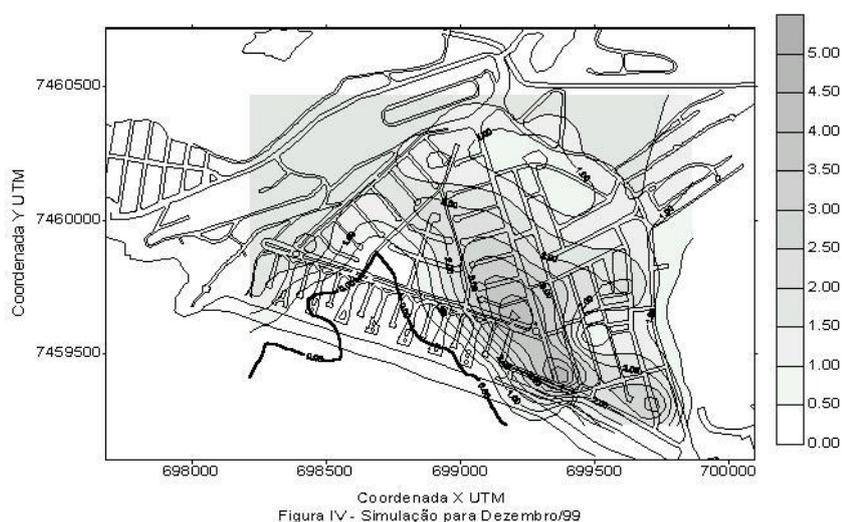


Figura IV - Simulação para Dezembro/99

Em linhas gerais, conforme discutido acima, a seqüência de simulações evidenciou que mantidas as condições atuais consideradas de recarga e extração de água do aquífero, existe uma tendência clara do rebaixamento gradual do nível do lençol freático. Há, inclusive, indicação de pontos com cotas abaixo do nível do mar que poderão provocar, também, alteração no sentido do fluxo subterrâneo aumentando significativamente o risco de salinização ou contaminação do aquífero por influência da água do mar.

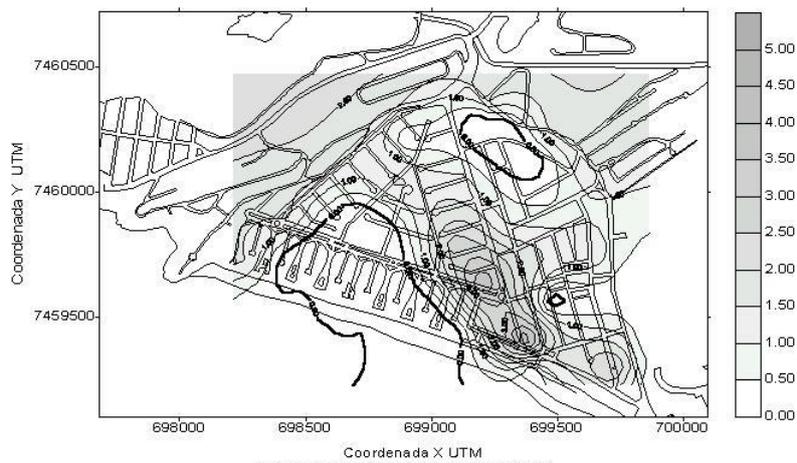


Figura V - Simulação para Dezembro/2002

CONCLUSÕES

Conclui-se que o modelo desenvolvido apresentou coerência na simulação dos cenários hidrogeológicos considerados, indicando a tendência de rebaixamento excessivo do nível do lençol freático para os próximos cinco anos, caso se verifique e, sejam mantidas as condições de recarga e extração adotadas na pesquisa. Esta situação aponta, também, para um eminente risco de intrusão salina motivado pela inversão do fluxo subterrâneo nas regiões em que as cotas do nível do lençol freático tornarem inferiores ao nível do mar. Como medida mitigadora, sugere-se a preservação de pontos de recarga do lençol, como por exemplo, manter e ampliar as áreas de parques e jardins, além da redução das taxas de extração de água dos poços nos períodos críticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOONSTRA, J. & RIDDER N. A. *Numerical modelling of groundwater basins*. ILRI Publication 29. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. The Netherlands. 1981. 226 p
- CAVALCANTI, M. A. M. P. *Impacto dos sistemas de saneamento "in situ" nas águas subterrâneas no bairro de Piratininga - município de Niterói/RJ*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. USP. São Paulo. 1996
- CEDERSTROM, C. J. *Água subterrânea. Uma introdução*. Centro de Publicações Técnicas da Aliança. Missão Norte-Americana de Cooperação Econômica e Técnica no Brasil - USAID. Rio de Janeiro. 1964
- CUSTODIO, E., LAMMAS, M. R. *Hidrologia subterrânea*. 2 tomos. Editora Omega. Barcelona. 1976
- LEE, D. T. & B. J. SCHACTER. *Two algorithms for constructing a Delauney triangulation*. *International Journal of Computer and Information Sciences*, 9(3). 219-242
- MASCARENHAS F.C.B. & NASCIMENTO E.A. *Modelagem numérica do fluxo de água subterrânea em aquífero não-confinado*. A Água em Revista. Revista Técnica e Informativa da CPRM. Ano V – Número 9. Belo Horizonte. 1997. pp 38-41
- MIZUBUTI, S. *Niterói bairros*. CECITEC-Consultoria Especial de Ciência e Tecnologia/Prefeitura de Niterói. 1991
- NASCIMENTO, E. A., MASCARENHAS, F. B. C. & MANSUR, W. *Modelagem inversa de um fluxo de água subterrânea*. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória. 1997. pp 431-438
- TSAI, V. J. D. *Delauney triangulations in TIN creation: an overview and a linear-time algorithm*. *Int. Journal of Geographical Information Systems*. Vol. 7 No. 6. 1993. pp 501-524
- UNITED NATIONS. *Groundwater software for windows. GWW. User's manual*. vols 1/2 e 2/2. United Nations. New York, 1994