

MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO POTENCIAL HÍDRICO SUBTERRÂNEO – ESTUDO DE CASO AQUIFERO COSTEIRO DE CAMBOINHAS

Patrícia Meliande¹; Elson Antonio do Nascimento² & Flavio Cesar Borba Mascarenhas³

Resumo - As águas subterrâneas vêm recentemente, ocupando lugar de destaque frente a alternativas para o abastecimento de regiões. Desta forma, a fim de se avaliar a capacidade dos aquíferos e a qualidade de suas águas, estudos devem ser realizados quanto aos parâmetros de condução e armazenamento do escoamento subterrâneo. A aplicação de técnicas sofisticadas, como é o caso da Modelagem Computacional, aliadas a estes estudos, proporcionam a garantia de utilização dos aquíferos, de modo eficiente e controlado, evitando-se a superexploração acelerada dessas fontes naturais, que levaram centenas de anos para alcançar a sua formação. O presente trabalho apresenta os resultados obtidos na análise do Aquífero Costeiro de Camboinhas através do modelo Modflow. Através de simulações realizadas, verifica-se que a superexploração contínua de água estava conduzindo a um rebaixamento gradual do nível do lençol freático, o que poderia ocasionar à contaminação do aquífero por intrusão salina.

Abstract - Groundwater, nowadays, is considered an important source of water supply to populations. Researches must be developping to recognize storage and water transimition parameters, so this is important to estimate the potential of the groundwater and its quality. The application of sofisticate techniques, like the **groundwater modeling**, represents the guarantee of control and efficient **aquifer** utilization, so it is important to avoid accelerated exploitation of these sources. The present work shows the results of the analisys of Camboinhas Coastal aquifer, using **Modflow** Model. Through the simulations, the results show that the **high exploitation** by pumping is responsible for the drawdown which could contaminate the aquifer by salt water intrusion. The experience of modeling tools is fundamental, because it is important to know its mechanisms, and make adaptations to tropical conditions.

¹ Departamento de Engenharia Civil – TEC – UFF – Av. Passos da Pátria, 156/sala 465 – Prédio Novo – São Domingos CEP:24210-240 Niterói, RJ – Brasil; pmeliande@yahoo.com.br

² Departamento de Engenharia Civil – TEC – UFF – Av. Passos da Pátria, 156/sala 465 – Prédio Novo – São Domingos CEP:24210-240 Niterói, RJ – Brasil; elsonn@vm.uff.br

³ Departamento de Hidráulica Computacional – COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil – Caixa postal N.º 68506; flavio@hidro.ufrj.br

Palavras-Chave - Modelagem; Aquífero; Cambonhas.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas, que representam aproximadamente 95% de toda água doce disponível para o consumo no planeta, vêm recentemente ocupando lugar de destaque frente as alternativas para o abastecimento de regiões, onde mananciais superficiais não existem ou sofrem degradações por agentes poluidores.

Apesar de encontrarem-se abaixo da superfície, há perigo de contaminação destes aquíferos da mesma forma que as água superficiais. A fim de evitar ou minimizar esses riscos é necessário o conhecimento detalhado do processo de fluxo de água, e conseqüentemente do transporte de contaminantes no solo. Estes mecanismos envolvem grande número de variáveis hidrogeológicas, difíceis de serem avaliadas através de fórmulas empíricas tradicionais. Sendo assim, novas tecnologias capazes de tratarem simultaneamente de um grande número de informações tornam-se necessárias e são viabilizadas somente através de ferramentas computacionais. O Visual Modflow - modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model -, por exemplo, representa um dos softwares mais conhecidos para a representação e o estudo de fluxos subterrâneos. Este mesmo programa contém um módulo denominado Modpath que tem capacidade de representar os fenômenos de transporte de contaminantes na zona saturada do solo. O código numérico do Modflow foi desenvolvido pelo Serviço Geológico Americano – USGS - e vem sendo distribuído pelo Waterloo Hydrogeologic Institute do Canadá. A cada versão, este modelo vem inovando através do incremento de novas técnicas e adaptações das ferramentas de pré e pós-processamento dos dados.

O presente trabalho apresenta os resultados obtidos na análise do Aquífero Costeiro de Cambonhas com o auxílio do modelo numérico **Modflow**^[1]. Através das simulações realizadas, verificou-se que a superexploração do aquífero estava conduzindo a um rebaixamento excessivo do nível do lençol freático, o que poderia ocasionar a sua contaminação por intrusão salina. Resultados semelhantes foram obtidos em estudos de simulação neste mesmo aquífero realizados anteriormente com o emprego do software SGMP-Standard Groundwater Model Package^{[2],[3]}). A despeito da convergência destes resultados acredita-se que o risco de salinização tenha sido eliminado devido à mudança no regime de utilização da água subterrânea no local, tendo em vista a recente instalação de sistema convencional de fornecimento de água na região, deixando, portanto, os poços do lençol freático de serem a principal forma de suprimento hídrico, como havia sido considerado nos dados utilizados nas referidas simulações. Por outro lado, esta coerência de resultados a partir de ferramentas distintas ressalta a importância dos modelos numéricos na análise de problemas

complexos podendo constituir-se em um instrumento eficaz na análise de sistemas hídricos para fins de outorga ou de estudos ambientais, auxiliando, portanto, na implementação da nova legislação de gestão de recursos hídricos no País.

CARACTERIZAÇÃO DO AQUÍFERO COSTEIRO DE CAMBOINHAS

Localização e Identificação da área em estudo

O bairro de Camboinhas está situado no Município de Niterói, área metropolitana do Estado do Rio de Janeiro, pertence à Região Oceânica, próxima aos bairros de Itaipu e Piratininga. Conforme apresentado na Figura (1), a região de Camboinhas apresenta topografia suave, e está cercada por um maciço rochoso, localizado à esquerda. Ao sul, se encontra o Oceano Atlântico e à direita, a Lagoa de Itaipu. Mais ao Norte, está localizado o Canal de Camboatá, que interliga as Lagoas de Piratininga e Itaipu. Ainda na figura, é apresentada a delimitação do Aquífero Costeiro de Camboinhas, objeto de estudo desta dissertação, que possui uma área estimada em torno de 100 ha e que, durante muito tempo, foi a única fonte de abastecimento de água da região.

O perfil litológico do aquífero é caracterizado como alúvio-lacustre, de acordo com o Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro ^[4]. Sua constituição é basicamente formada de solo arenoso, constituído por sedimentos marinhos, lacustres, eólicos e fluviais. Dessa forma, pode-se caracterizar o solo como de permeabilidade variando de média a elevada (NASCIMENTO, 1998)^[5]. Trata-se de aquífero livre, sobreposto tanto ao embasamento cristalino quanto a sedimentos mais antigos, e sua espessura varia em torno de 20 metros. Os aquíferos *alúvio-lacustres* geralmente se destacam pela importância hidrogeológica local, pois a qualidade da água normalmente é considerada boa a levemente ferruginosa.



Fonte : Prefeitura de Niterói/Secretaria de obras/2003

Figura 1 - Aquífero Costeiro de Camboinhas

O clima característico de Camboinhas é predominantemente quente e úmido ao longo de todo o ano, sendo que nos meses de dezembro a abril esta característica torna-se mais evidente, com temperaturas variando de 35 a 41° em pleno verão. Com base em dados fornecidos pelo posto pluviométrico da Ilha do Modesto, próximo à região, verifica-se que as chuvas intensas variam em torno de 80 a 160 mm ao longo do ano, distribuídas uniformemente em toda a área. Nos últimos anos, os bairros localizados próximos ao mar e também próximos aos centros urbanos começaram a ser valorizados e amplamente povoados. Camboinhas e seus vizinhos, Itaipu e Piratininga, são exemplos típicos deste processo. Devido aos seus atributos naturais estes bairros têm atraído inúmeras famílias, sobretudo, de classe média alta que passam a residir nestes locais de forma permanente. Este fenômeno é, em parte, explicado pelo fato das áreas centrais do município encontrarem-se, já há algum tempo, inteiramente ocupadas.

O processo de urbanização de Camboinhas

O crescimento desordenado da população na Região Oceânica obrigou à construção de poços tubulares rasos nas casas e poços profundos em alguns pontos estratégicos, a fim de atender às necessidades de abastecimento de água. Segundo ^[5], se a água que é renovada é captada, considerando um período de alguns anos, estabelece-se a *exploração* dos recursos. Se a quantidade de água utilizada ultrapassar à capacidade de renovação, isto indica a *superexploração* das reservas, caracterizada pelos níveis de água nos poços, que a cada ano se encontram mais baixos. Com base em pesquisas realizadas no local em 1997, alguns depoimentos de técnicos e moradores constataram o fato de que a superexploração desses poços estava conduzindo a um rebaixamento gradativo do nível médio de água nos poços rasos, o que acarretaria o esgotamento completo de alguns poços em períodos de verão, quando a população aumenta e o consumo de água passa a ser maior.

Outro fator alarmante era a possibilidade de intrusão salina, caso o rebaixamento fosse contínuo, o que comprometeria a qualidade das águas captadas, visto que estas águas muitas vezes eram consumidas sem nenhum tratamento prévio, devido à sua boa qualidade. Além da superexploração em virtude do crescimento acelerado da população, a construção de casas e o calçamento das ruas estavam sendo responsáveis pela impermeabilização do solo, favorecendo a uma maior proporção do escoamento superficial, e ao mesmo tempo, dificultando o processo de infiltração, que influencia a recarga do aquífero, condição imprescindível à manutenção e preservação dessas águas. Esses problemas são decorrentes do processo de urbanização, e podem ser observados de maneira esquemática, através da Figura (2), que apresenta as principais consequências da urbanização, que incidem sobre a quantidade e a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, de maneira geral.

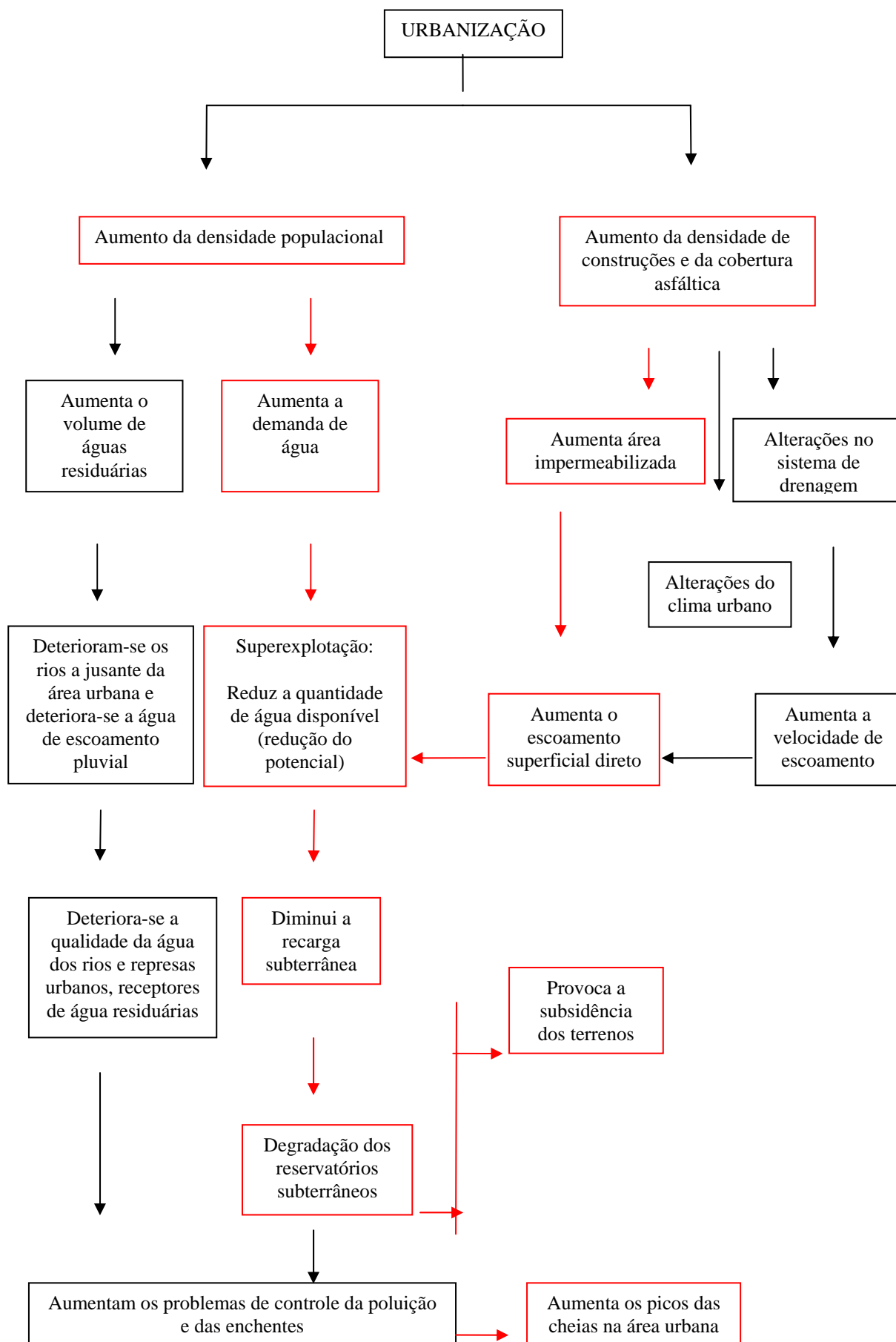


Figura 2 – Incidência da Urbanização sobre os corpos d’água subterrâneos

(Modificado de [6], 2000)

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO AQUIFERO COSTEIRO DE CAMBOINHAS

Em 1997 foi realizado estudo de modelagem numérica aplicada ao Aquífero de Camboinhas, com o emprego do modelo SGMP-Standard Groundwater Model Package ^[3]. Este modelo foi desenvolvido na Holanda, pelo instituto holandês, ILRI-International Institute for Land Reclamation and Improvement, e adaptado a fim de avaliar a potencialidade do aquífero costeiro de Camboinhas ^[7]. Na ocasião, o aquífero estava sendo explorado para o abastecimento da população local e flutuante da região. Este estudo serviu para avaliar o comportamento do aquífero frente às diferentes condições de stress, recargas e extrações do lençól freático, identificando, inclusive, o possível deslocamento ao longo do tempo da linha de interface água doce/água salgada.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} dx \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} dy \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial z} dz \right) = P + \frac{\nu}{T} \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

$$\sum_i \left[(h_i^{t+1} - h_b^{t+1}) \frac{K_{i,b} D_{i,b} W_{i,b}}{L_{i,b}} \right] = A_b P_b^{t=1} + \frac{A_b \nu_b}{\Delta t} (h_b^{t+1} - h_b^t) \quad (2)$$

Na Equação 2, b corresponde ao nó central, i, o nó de conectividade, $W_{i,b}$, o comprimento do lado entre os nós i e b, $L_{i,b}$, a distância entre os nós i e b, A_b , a área associada ao nó b, ν_b , o coeficiente de armazenamento da área A_b , $K_{i,b}$, a condutividade hidráulica entre os nós i e b e $D_{i,b}$, a altura média do aquífero entre os nós i e b.

Aquisição e aplicação de dados

Os dados de entrada, necessários à modelagem com a utilização do Modflow, consistem em mapeamento da área de Camboinhas, identificação de perfis geológicos e levantamentos em campo de parâmetros necessários à compreensão do comportamento do fluxo de água subterrânea. Esse conjunto de informações foi identificado e coletado para a aplicação no modelo, embora seja reconhecido que a falta de acesso às séries históricas, e a impossibilidade de um maior detalhamento da caracterização física do aquífero, foram fatores que faltaram para a determinação de um maior grau de eficiência, em relação aos resultados apresentados na modelagem com o Modflow. A seguir, serão descritos os procedimentos quanto à modelagem e aplicação dos dados no modelo. Cabe ressaltar que a execução da modelagem está restrita somente à medições realizadas nos poços rasos.

Condições de contorno

As condições de contorno determinam os limites e características da região analisada e constituem fatores fundamentais para o processo de modelagem. Os contornos representam as interfaces entre o domínio e as interferências relativas às condições externas e impostas sobre a área de interesse, evidenciando-se, dessa forma, a individualização de determinado problema.

Existem diferentes tipos de contornos, que podem ou não variar de acordo com o tempo. As condições de contorno, em geral, são classificadas em *contorno de fluxo-zero*, *contorno de potencial-controlado* e *contorno de fluxo-controlado*.

O contorno de *fluxo-zero*, na prática, pode ser definido como aquela localidade, adjacente ao aquífero, onde o fluxo de água é insignificante se comparado com o fluxo no aquífero principal.

O contorno de *potencial-controlado* se caracteriza pelo conhecimento do potencial hidráulico, podendo este variar ou permanecer constante ao longo do tempo. Como exemplo deste tipo de contorno destacam-se os grandes corpos d'água, como lagos, lagoas ou oceanos, que delimitam aquíferos, e ainda, consideram-se rios e canais de irrigação, cujos níveis de água podem ser considerados como fixos.

Por último, o contorno de *fluxo-controlado* está relacionado a fronteiras, através das quais um determinado volume de água é adicionado ao aquífero, a partir de um extrato geológico, em que propriedades desse material, como potencial hidráulico e permeabilidade são conhecidos. Esse tipo de contorno é denominado também como contorno de recarga. A recarga da chuva e os poços de injeção, responsáveis pela entrada de água nos aquíferos, são considerados contornos do tipo fluxo-controlado, da mesma forma, a extração realizada através dos poços de bombeamento, também é considerada contorno de fluxo-controlado. Na hidráulica em geral, os poços de bombeamento são conhecidos como *sumidouros*, enquanto que as recargas e poços de injeção são designados de *fontes*.

Também podem ser considerados como condição de contorno as chamadas *fronteiras-móveis*, caracterizadas pela variação no tempo, e para esse caso, pode-se destacar o nível do lençól freático em aquíferos livres, além da *interface água doce/água salgada*, contorno específico para aquíferos costeiros, que considera a diferença de densidades entre a água oriunda do aquífero, considerada doce, e a água salina.

No caso do Modelo Camboinhas, com base nas informações das características geofísicas e hidrológicas do aquífero, assume-se para todos os contornos, o tipo de potencial-controlado, inclusive para a região do maciço montanhoso. Conforme destacado anteriormente, este tipo de contorno, assim como a camada impermeável poderia se enquadrar como fluxo-controlado, devido às suas peculiaridades. Porém, a dificuldade de se identificar e quantificar as propriedades relativas a este contorno conduziu a considerá-lo como potencial-controlado, assumindo-se um valor constante para o nível dos poços localizados próximos a esta região.

A falta de evidências de fluxos na base do aquífero levou a assumir a camada impermeável, situada a uma profundidade média de 18 metros da superfície do solo, como contorno de fluxo-zero, e dessa forma, considera-se que não há ocorrência de fluxos para dentro do aquífero, e nem no sentido contrário. Entretanto, hipóteses não são descartadas quanto à ocorrência de falhas geológicas ou outras formações que propiciam a ligação entre o aquífero freático e o aquífero confinado, responsável pelo abastecimento de alguns poços profundos, situados na região ^[3]. A Tabela (1) apresenta os diferentes tipos de contorno e os respectivos potenciais.

Tabela 1 – Demonstrativo dos potenciais assumidos no contorno

Contorno :	Tipos :	Poços :	Potenciais (m) :
Maciço Rochoso	Potencial-controlado	26,27,28,29,30,31,32,33, 34,44	1,6
Canal de Camboatá	Potencial-controlado	35,36	0,2
Lagoa de Itaipú	Potencial-controlado	37,38	0,2
Praia de Camboinhas	Potencial-controlado	39,40,41,42,43,45,46,47	0; 1,4 (Poço 39)
Camada Impermeável	Fluxo-zero	-	-

Vale ressaltar também que em Camboinhas, como se trata de um aquífero costeiro, a praia é considerada como fronteira móvel do aquífero, e caracteriza a interação água doce/água salgada. A diferença de densidade acrescenta um grau, ainda maior, de complexidade ao estudo do fluxo de água subterrânea visto que nos poços de contorno situados próximos à praia havia evidências de que a água era considerada de boa qualidade, mostrando-se própria para o uso doméstico. Vários fatores justificavam essa condição, um deles é a predominância do fluxo no sentido do aquífero para o mar.

Como se trata de aquífero não confinado, o limite superior do lençol freático representa a superfície livre do aquífero e, por sua vez, também é classificado como fronteira móvel, pois apresenta característica transiente. Os fatores que mais influenciam esta característica são a recarga proveniente da água da chuva e a extração da água dos reservatórios subterrâneos através de bombeamento em poços rasos. Desta forma, a superfície livre do aquífero é considerada o principal contorno do aquífero.

A recarga e a extração são as condições de contorno consideradas relevantes para esse estudo, devido aos elevados volumes provenientes destas condições, que movimentam a superfície livre do

lençol, portanto, merecem maior destaque. No Modflow, estas condições apresentam características de entrada de dados próprias. A seguir, serão comentados aspectos desses dois tipos de condições, ressaltando a forma de introdução destes valores no Modflow.

Recarga

Os valores referentes à evapotranspiração não foram computados. Diante disso, apenas foi considerada a condição de recarga da chuva, atribuindo-se a esta, uma taxa no valor de 20% da chuva com intensidades superiores a 90 mm. A unidade fornecida pelo modelo e considerada na simulação corresponde a mm/ano, e o valor considerado para a recarga foi de 158 mm/ano, distribuída uniformemente ao longo de toda a área do aquífero.

Extração

Os poços profundos atingem mais ou menos 80 metros de profundidade, ultrapassando o limite do topo rochoso. O estudo somente considerou poços rasos com profundidade variando em torno de 12 a 17 metros. Ao todo, foram considerados 47 poços, dos quais 25 representam o domínio da região modelada e o restante, o contorno. Considerou-se um consumo médio de 200 litros/habitante/dia nos meses de dezembro a março e para os meses de abril a novembro, admitiu-se um consumo médio de 100 litros/habitante/dia ^[5]. Os valores totais foram calculados com base em uma população de 4000 pessoas distribuídas na área representada pelos 25 poços. A área de influência de cada poço foi determinada a partir do método de Thiessen.

Discretização do Domínio

O Modflow utiliza o método das diferenças finitas para a representação algébrica das equações governantes do problema de fluxo subterrâneo. A discretização do domínio é realizada por malha regular representada através de blocos. Estes blocos podem apresentar iguais dimensões ou variações em determinados locais, caracterizando o processo de refinamento.

A malha ou grid é considerada um dos fatores primordiais para o bom desempenho da modelagem e a sua escolha possui caráter relevante na disposição e aplicação dos dados. Devido às diferentes condições espaciais e hidrogeológicas, uma malha pode ser apropriada para um determinado domínio no que se refere ao espaçamento e à uniformidade do grid, e inapropriada para outro. Alguns procedimentos são fundamentais na definição do grid, destacando-se:

- a) o conhecimento do tipo de problema a ser resolvido
- b) a precisão exigida dos resultados
- c) a homogeneidade e heterogeneidade do aquífero
- d) a disponibilidade dos dados

- e) a forma dos contornos
- f) o número de nós

Em Camboinhas, a modelagem do aquífero foi motivada pela *necessidade de se quantificar a superexploração já evidenciada*. Além disso, através da modelagem, pôde-se avaliar *a capacidade do aquífero de abastecer aquela região em amplo desenvolvimento sócio-econômico, e implantar medidas, de modo a se evitar a degradação prematura desta reserva natural*.

A fim de se alcançar estes objetivos, a *precisão dos resultados* é imprescindível. Porém, conforme citado anteriormente, a falta de acesso à séries históricas e a dificuldade na obtenção dos dados de campo impedem que os resultados apresentem um grau de eficiência elevado. Os dados coletados e utilizados na entrada do modelo, e a forma como esses dados são inseridos interfere diretamente no processamento, confirmando a idéia de que a simulação fornece resultados fortemente dependentes dos dados de entrada, e pode ser interpretada pela conhecida expressão

“Garbage in => Garbage out”.

Minimizadas as limitações comentadas acima, as informações colhidas servem de base para a verificação das situações atuais e futuras, e possibilita a comprovação, através de análises numéricas e gráficas das suposições, acerca do abaixamento gradativo do nível do lençol, e da vulnerabilidade a que o aquífero está exposto. Aliado a estes fatores, a *forma dos contornos* é um fator determinante para a escolha da malha, e diferencia o problema em questão. A malha influencia na disposição das informações necessárias à modelagem, dentre elas a questão da *homogeneidade e heterogeneidade do aquífero*, e é responsável pela geração de uma quantidade do *número de nós* que, por sua vez, dependem da necessidade de disponibilidade dos dados, conforme comentado anteriormente.

Na modelagem de Camboinhas, através da aplicação com o Modflow, verificou-se que o tipo de configuração do contorno não é adequado à adoção de malha regular. Nesse sentido, cuidados foram tomados, pois o uso de uma malha regular acarreta problemas em virtude do contorno em geral não coincidir com os nós gerados ^[3].

Os resultados passaram a demonstrar melhor convergência a partir do refinamento da malha junto à localização dos poços e próximo às regiões de contorno. Este procedimento acarretou a consequência inevitável da geração de muitas células e nós para poucos dados disponíveis. Ou seja, o Modelo de Boonstra, discretizado com malha irregular possui um total de 47 nós para representar todo o domínio. A simulação desta mesma área, utilizando o Modflow, com aplicação de malha regular, resultou na geração de aproximadamente 3000 nós e células (Figura 3). Entretanto, a velocidade de convergência de malhas irregulares é menor em relação às malhas regulares, o que implica em número maior de iterações necessárias para o cálculo das variáveis. Dessa forma, recomenda-se quando possível, a utilização de malhas regulares ^{[8]; [2]}.

O Modflow possui recursos de interpolação de dados capaz de permitir a estimativa de dados para o total de células do domínio a partir dos 47 pontos conhecidos. Entretanto, adotando-se este procedimento, pode-se incorrer no erro de estar modelando uma área totalmente hipotética. Ou seja, os parâmetros da caracterização física do aquífero, incluindo as condições iniciais de contorno, estariam muito mais influenciados pelos critérios de extrapolação de dados do que pelos valores medidos à nível de campo.

Para evitar este problema, a solução adotada foi sobrepor a malha irregular do modelo de Boonstra no formato de polígonos de Thiessen (Figura 4), à malha regular em forma de células ou blocos, adotada no Modflow. Isto resultou em uma discretização do domínio representada por cerca de 25 regiões uniformes, com formato aproximado a polígonos (Figura 5). Nestas regiões, então, foram atribuídas as propriedades e condições iniciais que são discutidas nos itens seguintes.

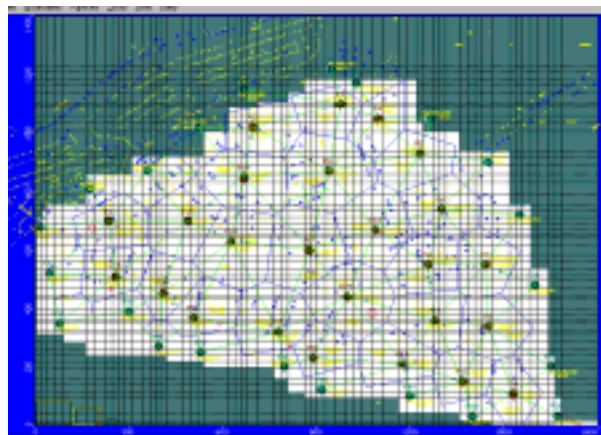


Figura 3 – Discretização espacial e refinamento da malha no Modflow

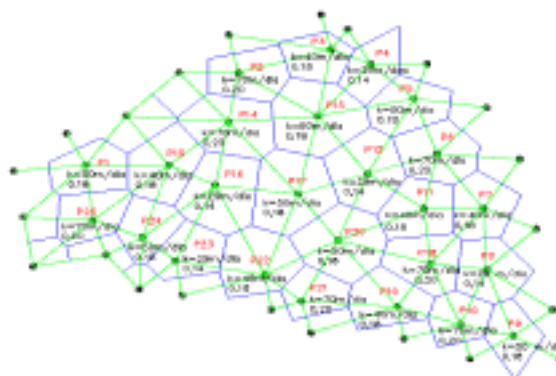


Figura 4 – Sub-regiões definidas através do Método dos Polígonos de Thiessen



Figura 5 – Sub-regiões definidas no Modflow

Propriedades

As propriedades, caracterizadas por parâmetros hidrogeológicos como as condutividades hidráulicas, os coeficientes de armazenamento e os potenciais hidráulicos, foram distribuídas através de áreas de influência, limitadas através dos Polígonos de Thiessen, conforme apresentado na Figura 5. As condições de contorno determinam os limites e características da região analisada. Em Camboinhas, os contornos determinantes são a recarga proveniente da água da chuva e a extração da água dos reservatórios subterrâneos através de bombeamento em poços rasos.

CONCLUSÕES

Após a aplicação dos dados necessários à simulação do modelo, parte-se para o processamento, onde os dados foram computados em regime transiente, de acordo com intervalos de tempo estabelecidos, conhecidos como períodos de stress. Estes períodos são definidos como intervalos de tempo dentro dos quais todas as condições de contorno no sistema são constantes.

Esses períodos são divididos em passos de tempo, estabelecidos na fase de processamento. Ao longo desses passos, o modelo verifica através das propriedades de estabilidade numérica, consistência e convergência a aceitabilidade da solução utilizando a Equação da continuidade. Ou seja, o modelo calcula a diferença entre os fluxos de entrada e saída, e esses dados são observados através do Output, que representa a saída dos dados gráficos e numéricos, ou propriamente dita, a fase de pós-processamento.

Os resultados da simulação serão apresentados a seguir, e consistem na apresentação dos gráficos dos potenciais gerados pelo Modflow (Figura 6) e SGMP (Figura 7) nas condições iniciais, correspondente ao ano de 1997, além dos cenários equivalente a 5 anos – 1825 dias (Figuras 8 e 9), também gerados pelos dois modelos. No primeiro cenário, que equivale a um período de 365 dias,

foram considerados os dados das condições de contorno e propriedades, descritas anteriormente. Para os demais cenários, os valores foram os mesmos, alterando-se somente os períodos de stress.

A modelagem implica em um processo de simplificação e representação da realidade, e dependendo da qualidade e disponibilidade dos dados de entrada, além dos mecanismos relacionados à discretização do modelo, poderão apresentar resultados esperados e possivelmente validados. De acordo com a modelagem descrita, os parâmetros considerados correspondem à apresentação das condições iniciais, e à evolução das condições de nível d'água ao longo dos cenários estabelecidos.

No primeiro cenário, referente ao primeiro ano – 365 dias, constata-se a influência do bombeamento, com uma queda considerada brusca, variando em torno de 3 metros na região, que compreende os poços 11, 12, 13, 17 e 20, esta região apresenta níveis mais altos, que podem ser constatados no gráfico de condições iniciais. De maneira geral, a variação da superfície do lençol freático acompanha o comportamento topográfico da área, o que é geralmente normal, em se tratando de aquíferos livres. Já, na região entre o maciço rochoso e a praia, identificada pelos poços 21, 22, 23, 24 e 25, as velocidades são menores, pois são caracterizadas pelo nível do lençol mais baixo. Logo neste cenário, a simulação indica para os poços 22, 23 e 24, risco de vulnerabilidade ao risco de presença de sais, provenientes do avanço do mar em direção ao aquífero.

No segundo cenário – 730 dias, o nível de água apresenta, basicamente, a mesma variação para os poços 11, 12, 13, 17 e 20. Já, mais próximo ao maciço rochoso, o nível do lençol vem rebaixando a uma taxa de 0,5 metro, visualizada pelos poços 1, 15, 16, e também 19, poço localizado mais próximo ao mar. Ao nível da Lagoa também pode-se constatar tal rebaixamento.

Ao longo da evolução dos cenários, a simulação aponta queda dos níveis na região com maiores potenciais e evidencia em alguns poços cotas abaixo do nível do mar. Neste momento, em torno do ano 2000, Cambinhas passa a ser abastecida pelo Sistema Imunana-Laranjal. Caso a condição da superexploração persistisse, a simulação demonstra a ocorrência de reversão do sentido do fluxo subterrâneo em relação ao mar, o que também não seria impossível de ocorrer em relação à Lagoa de Itaipu, caso fossem mantidas as mesmas condições referentes à recarga e à extração impostas ao aquífero. Esta situação constata o fato, já evidente na época, de que o rebaixamento gradativo do nível do lençol em poços rasos já estava conduzindo a níveis críticos de exaustão e escassez em determinados períodos.

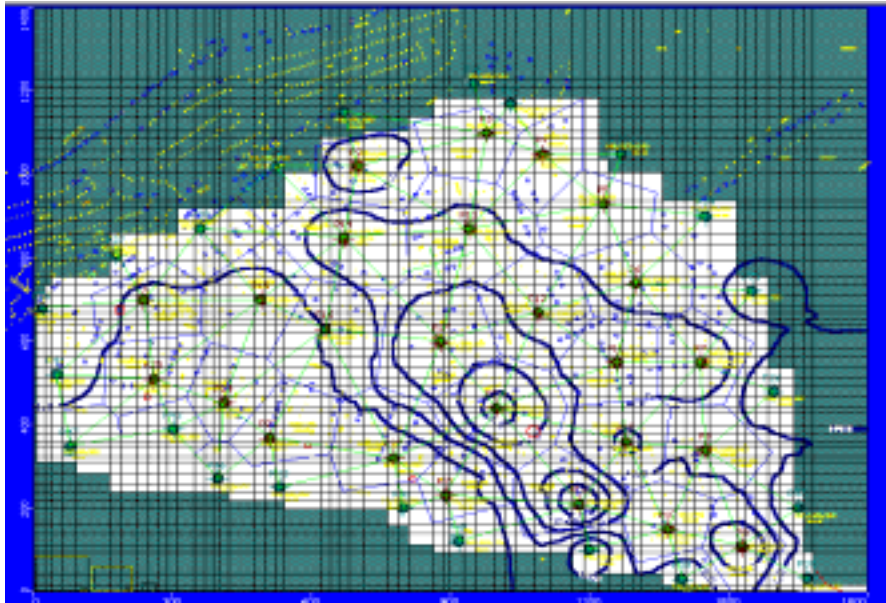


Figura 6 – Condições iniciais – 1997/Modflow

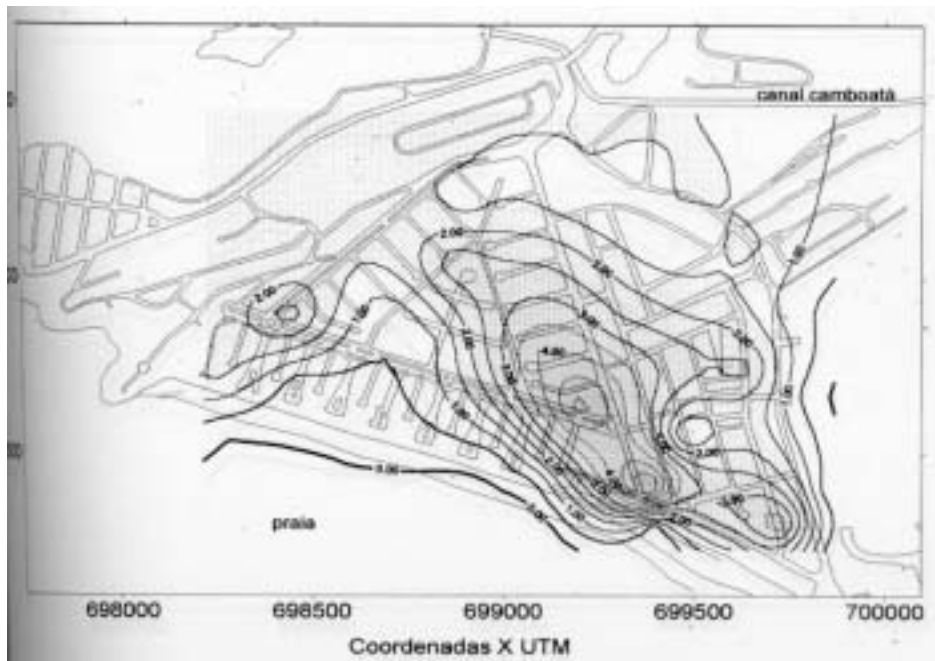


Figura 7 – Condições iniciais – 1997/Modelo de Boonstra

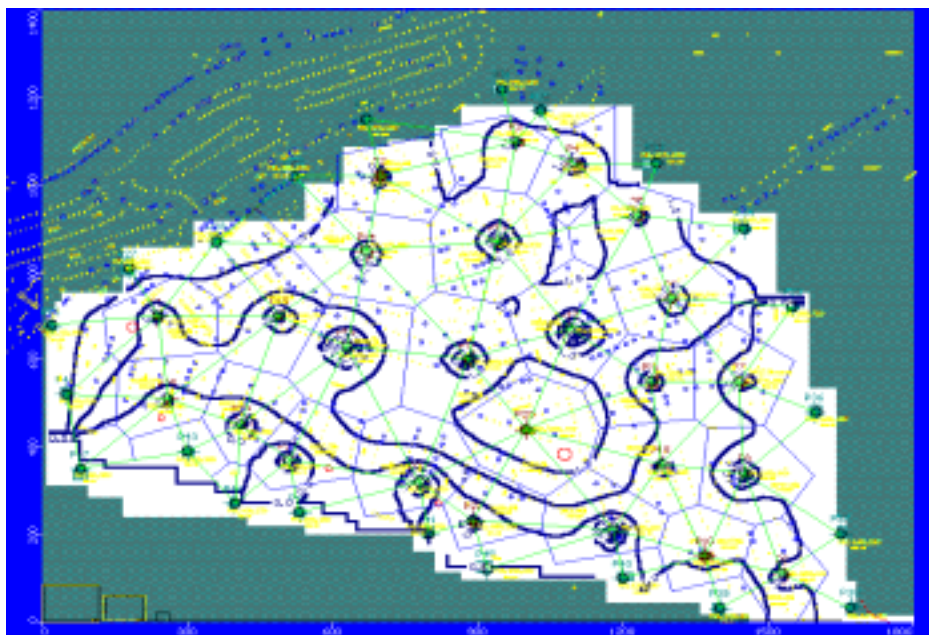


Figura 8 – Condições finais – 2002/Modflow

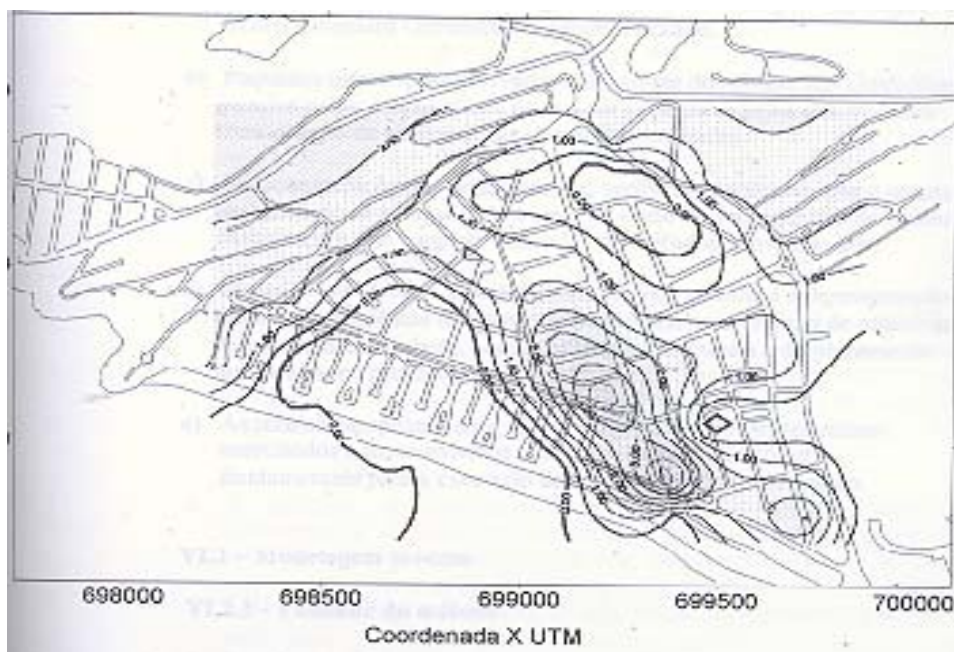


Figura 9 – Condições finais – 2002/Modelo de Boonstra

O balanço hídrico apresenta valores referentes aos volumes de recarga e extração por bombeamento, calculados com base nos dados registrados e coletados para um período de um ano. A tabela (1) apresenta o comparativo entre os valores resultantes do balanço recarga e extração nos modelos SGMP e Modflow.

Tabela 2 – Comparativos do balanço hídrico global recarga/extração

SGMP	Balanço hídrico:	Modflow	Balanço Hídrico:
Recarga (m ³)	157301,00	Recarga (m ³)	157888,75
Extração (m ³)	191150,60	Extração (m ³)	191143,20
Saldo (m ³)	-33849,60	Saldo (m ³)	-33254,45
Lâmina (mm)	-34	Lâmina (mm)	-33

A despeito da convergência destes resultados acredita-se que o risco de salinização tenha sido eliminado devido à mudança no regime de utilização da água subterrânea no local, tendo em vista a recente instalação de sistema convencional de fornecimento de água na região, deixando, portanto, os poços do lençol freático de serem a principal forma de suprimento hídrico. Por outro lado, esta coerência de resultados a partir de ferramentas distintas ressalta a importância dos modelos numéricos na análise de problemas complexos, constituindo-se em um instrumento eficaz na análise de sistemas hídricos para fins de outorga ou de estudos ambientais, auxiliando, na implementação da nova legislação de gestão de recursos hídricos no País.

A combinação de tecnologias pode tornar-se fundamental para a execução do novo modelo de gestão de recursos hídricos e nas análises necessárias ao procedimento de outorga a partir geração de informações a questionamentos como os destacados a seguir:

- a) Delimitação de áreas de recarga para fins de sua proteção a partir da identificação do comportamento do fluxo subterrâneo e sua influência na captação de água em poços existentes e projetados.
- b) Estimativa de distâncias mínimas para perfuração de novos poços, evitando-se a superposição dos cones de depressão.
- c) Determinação de extração máxima visando o equilíbrio entre extração e recarga de modo a garantir a sustentabilidade do aquífero.
- d) Previsão dos riscos de transportes de contaminantes para os aquíferos e pontos de captação.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] MacDONALD, M.G. & A.W.HARBAUGH; *A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model*. Techniques of Water Resources Investigations. Washington. 1988. 586p.

- [2] BOONSTRA, J. & RIDDER, N.A.; *Numerical modelling of groundwater basins*. ILRI. ISBN 90 70260 69 7. Wageningen, The Netherlands, 1981. 226p.
- [3] MASCARENHAS, F.C.B. & NASCIMENTO, E.A.; *A Modelagem numérica do fluxo de água subterrânea em aquífero não confinado*. Revista da CPRM. São Paulo. 1999.
- [4] CAPUCCI, E., MARTINS, A.M., MANSUR, K.L., MONSORES, A.L.M.; *Poços tubulares e outras captações de água subterrânea : orientação aos usuários*. Cooperação Técnica Brasil-Alemanha. Projeto PLANÁGUA-SEMADS/GTZ. ISBN 85-87206-11-7. Rio de Janeiro. 2001. 70 p.
- [5] SAN ROMAN, F.J.S., *El Ciclo Hidrológico*. Departamento de Geologia. 2001. 7p.
- [6] TUCCI, C. E. M.; *Hidrologia. Ciência e Aplicação*. 2.^a Edição. ABRH. Editora da Universidade/UFRGS. ISBN 85-7025-298-6. Porto Alegre, 2000. 943 p.
- [7] NASCIMENTO, E. A.; *Modelagem Matemática do Fluxo de água subterrânea*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1998. 175p.
- [8] RUSHTON, K.R. & S.C. REDSHAW; *Seepage and groundwater flow*. John Wiley & Sons. Nova York. 1979. 339 p.