

USO SUSTENTÁVEL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE MACEIÓ

Manoel de Melo Maia Nobre¹ & Rosane Cunha Maia Nobre²

Resumo - A avaliação numérica do fluxo de águas subterrâneas através de modelos matemáticos favorece um planejamento racional e uso sustentável de mananciais hídricos subterrâneos. Um modelo numérico tridimensional foi implementado e aplicado para a Região Metropolitana de Maceió (RMM), com o propósito de avaliar, em primeira etapa, o padrão de fluxo na região assim como as interferências causadas por diferentes condições de bombeamento. Isto também possibilitará a definição de zonas de captura dos poços e identificação de áreas com maiores riscos de contaminação. Este exercício de modelagem já permite constatar que o atual sistema de extração tem causado perturbações significativas no regime de fluxo do sistema Barreiras/Marituba, a exemplo de processos de intrusão marinha verificados, inclusive em poços de bairros mais afastados da orla marítima. A avaliação da disponibilidade hídrica daquele sistema de aquíferos, na área em estudo, por um lado, e as demandas pelo uso da água na RMM evidenciaram que o volume total de águas subterrâneas ora extraídas já é superior à recarga, para uma dada taxa de infiltração. Dessa forma, além de uma regulamentação adequada do uso e proteção do sistema Barreiras/Marituba da RMM, que reflita aspectos técnicos tratados neste trabalho, processos de reinjeção de águas pluviais devem ser considerados como uma das alternativas existentes.

Palavras-chave - Modelagem numérica; gestão de recursos hídricos, proteção de águas subterrâneas.

¹ Professor Adjunto da UFAL, Departamento de Geociências, Campus A.C. Simões, BR-104, Tabuleiro dos Martins, Maceió, AL, CEP:57072-970. Tel: (82) 214-1444, e-mail: manoelmaia@uol.com.br.

² Professora Assistente da UFAL, Departamento de Águas e Energia, Campus A.C. Simões, BR-104,

INTRODUÇÃO

Os mananciais hídricos subterrâneos são tradicionalmente utilizados como fontes de abastecimento d'água para uso doméstico, industrial ou agrícola. A qualidade de suas águas, aliada à facilidade de extração em locais com escassez de águas de superfície, tem sido um fator importante e decisivo para o desenvolvimento de sistemas de extração em larga escala e de reduzidos custos visando satisfazer, quase sempre, demandas cada vez mais elevadas. Serviços públicos ineficientes ou muitas vezes inexistentes podem também contribuir para a busca de soluções mais imediatas e sem o devido controle por parte da comunidade. A qualidade e quantidade das águas subterrâneas, entretanto, podem ser comprometidas caso a exploração não seja fundamentada em estudos preliminares de planejamento e de uso sustentável dos mananciais. É importante que seja assegurada, às gerações futuras, uma disponibilidade hídrica em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, bem como a proteção dos mananciais contra fontes poluentes. Cabe ressaltar, ainda, que a recuperação de aquíferos contaminados é complexa, tendo em vista a lenta renovação de suas águas, com velocidades de fluxo extremamente reduzidas, bem como os elevados custos de remediação.

A integração dos sistemas hídricos subterrâneos com as bacias hidrográficas e sistemas estuarinos deve ser contemplada no processo de gestão das águas. É de conhecimento que os reservatórios de águas subterrâneas se encontram, na maioria dos casos, subjacentes a sistemas de água de superfície, como rios, lagos e reservatórios, podendo estar hidraulicamente conectados aos mesmos. A gestão integrada de mananciais subterrâneos e de superfície permite uma avaliação das “trocas” hidráulicas entre esses corpos e da qualidade de suas águas. Por exemplo, durante períodos de baixas vazões fluviais, a exploração de águas subterrâneas poderá satisfazer as demandas hídricas existentes. É neste período seco que as águas de descarga do aquífero garantem uma vazão regularizada nos rios. Em períodos chuvosos, por outro lado, quantidades em excesso de águas com origem no escoamento superficial poderão ser desviadas para poços de injeção ou canais fluviais de forma a recarregar as reservas dos aquíferos mais superficiais. A reinjeção de águas doces no subsolo poderá, também, servir como uma alternativa de remediação de aquíferos atingidos pela intrusão marinha devido à exploração excessiva de suas águas, a exemplo do que já está ocorrendo em cidades costeiras como Recife e Maceió.

A gestão dos recursos hídricos subterrâneos deve sempre ser estabelecida com base na avaliação de condições hidrogeológicas específicas bem como de possíveis impactos ambientais associados ao desenvolvimento e implantação de equipamentos de extração para satisfazer demandas múltiplas e usos cada vez mais competitivos de água. O gerenciamento e planejamento só podem ser realizados com base na representação do sistema conceitual físico do domínio, incluindo processos de fluxo e de transporte de massa – poluentes – que ocorrem no meio poroso ou fraturado. Assim, a metodologia recomendada neste trabalho inclui a aplicação de modelos numéricos que possibilitam a realização de algumas previsões de comportamento do sistema hídrico subterrâneo na Região Metropolitana de Maceió (RMM).

No Estado de Alagoas, em particular, tem-se verificado, nos últimos anos, uma tendência crescente para o aproveitamento das águas provenientes de mananciais subterrâneos, visando o abastecimento urbano e rural. Esta forma de captação já se constitui na principal fonte de abastecimento, numa vasta área compreendida pela bacia sedimentar Alagoas-Sergipe, localizada ao longo do litoral alagoano. A RMM tem hoje cerca de 80% de seu suprimento com origem nos recursos hídricos subterrâneos, fartos e de boa qualidade, através de mais de 400 poços profundos. Esses mananciais hídricos, entretanto, vêm sofrendo um processo contínuo de degradação e diminuição de sua reserva renovável, decorrente da extração não controlada de suas águas através de inúmeros poços tubulares. Isto se deve a uma ocupação desordenada do meio físico e aumento da demanda hídrica, bem como a não regulamentação, até o momento, do regime de outorga de direitos de uso de mananciais hídricos, como estabelece a Lei Estadual de Recursos Hídricos aprovada em 1997. É oportuno lembrar que a descontinuidade do Projeto Pratygy, que certamente teria garantido uma maior disponibilidade de vazão para os bairros da zona norte da cidade, levou a perfuração de quantidade ainda maior de poços na área, para suprir a demanda crescente.

Vale salientar, ainda, que as atividades sucro-alcooleiras desenvolvidas na região, a existência de lixões e de tanques enterrados dos postos de gasolina bem como a falta de saneamento básico adequado na cidade constituem-se em elementos potenciais de contaminação do sistema Barreiras/Marituba. A possibilidade de compostos orgânicos derivados do petróleo (BTEX) ou compostos como bifenilas policloradas (i.e., ascarel) atingirem os aquíferos mais superficiais, por exemplo, é uma realidade e isto pode ocorrer em pouco tempo após a infiltração no solo. Entretanto, a descontaminação dessas águas poderá levar de dezenas a centenas de anos, demandando tecnologias específicas e

custos ainda desconhecidos para a comunidade de Maceió.

Alguns esforços já vêm sendo mobilizados pela comunidade técnica local e o governo do Estado de forma a regulamentar a Lei Estadual de Recursos Hídricos. Apesar disso, os aspectos técnicos continuam ainda pouco discutidos e/ou conhecidos. Vale ressaltar que a gestão integrada desses recursos hídricos só será efetiva se fundamentada em conhecimentos técnicos específicos.

O objetivo deste trabalho é consolidar os resultados preliminares da modelagem numérica do fluxo das águas subterrâneas realizada para a RMM, de forma a já dar início a uma avaliação sistêmica da questão. Previsões quanto aos riscos de contaminação e processos de intrusão da cunha salina poderão ser avaliados em etapa posterior, permitindo uma melhor proteção dos mananciais hídricos atualmente explorados. Nesse exercício de modelagem, foram utilizados modelos tridimensionais de fluxo de águas subterrâneas e de rastreamento de partículas, na previsão de cargas potenciométricas e velocidades de fluxo, aplicados a meios heterogêneos, anisotrópicos e saturados. As equações diferenciais parciais obtidas pelo modelo matemático de fluxo, juntamente com as condições de contorno, foram resolvidas numericamente pelo Método das Diferenças Finitas.

ASPECTOS CLIMÁTICOS E HIDROGRAFIA

A cidade de Maceió está inserida numa região de clima quente e úmido, com regime uniforme de chuvas, marcado por duas estações bem definidas. A estação chuvosa se estende de março a agosto, quando é registrado cerca de 75% da precipitação total anual, que corresponde, em média a 1670 mm. A temperatura é homogênea ao longo do ano, com valores médios da ordem de 25 °C. Estima-se que a taxa de infiltração na região metropolitana de Maceió, na região dos tabuleiros, seja da ordem de 30% do total precipitado (Saldanha *et al.*, 1980). Com a crescente taxa de urbanização e ocupação do solo em Maceió, em particular em áreas de recarga do sistema aquífero subterrâneo, tem-se verificado uma maior “impermeabilização” das zonas de infiltração, dificultando a recarga durante os meses de inverno. Isto implica em uma flutuação menos abrangente do lençol d’água subterrâneo e conseqüente diminuição da reservas exploráveis do sistema de aquíferos Barreiras/Marituba na RMM.

A rede hidrográfica é caracterizada por pequenas bacias que deságuam suas águas no Lagoa Mundaú, a exemplo dos riachos Cardoso e Catolé, ou no oceano Atlântico, como os riachos Reginaldo, Jacarecica e riacho Doce. Os rios são perenes, na maioria,

devido à alimentação das águas subterrâneas que afloram nos vales mais profundos, sob a forma de exutórios naturais ou fontes. O escoamento superficial é pouco expressivo, e o regime fluviométrico dessas bacias está diretamente ligado à recarga do escoamento base.

GEOLOGIA REGIONAL

A área em estudo situa-se nos domínios da Bacia Sedimentar Alagoas-Sergipe, ocorrendo ao longo de todo o litoral alagoano, e é limitada, à oeste, pela linha da falha principal, no contato com o cristalino (Lima, 1990). Esta falha é grosseiramente paralela à linha litorânea e dela afasta-se cerca de 20 Km. Os sedimentos da Bacia Alagoas-Sergipe assentam-se sobre rochas ígneas e metamórficas, que formam o Complexo do Embasamento, a cerca de 6.000m de profundidade, e que apresentam estruturas em forma de “horst” e “graben” (Saldanha *et al.*, 1980). A estratigrafia dessa bacia é consequência direta da sua evolução estrutural, sendo o preenchimento sedimentar variável de um compartimento tectônico para outro, configurando várias sub-bacias. Como o soerguimento ou subsidência de cada compartimento processou-se de modo desigual ao longo do tempo, verifica-se uma distribuição espacial complexa das unidades crono e litoestratigráficas (Lana, 1990).

A espessa seção de sedimentos acumulados nesta depressão, na região em estudo, apresenta um mergulho suave e uma grande variação faciológica, definindo, da base para o topo, as formações Coqueiro Seco, Ponta Verde, Muribeca (membros Maceió, Carmópolis e Ibura), Piaçabuçu (membro Marituba) e Barreiras. Estas últimas constituem-se nos horizontes mais permeáveis da região em estudo, com espessuras superiores a 200 m, caracterizados pelos aquíferos Barreiras e Barreiras/Marituba. A geologia de superfície da área pode ser representada pelo mapa de sub-afloramentos da discordância pré-Barreiras, elaborado e apresentado na **Figura 1** (adaptado de Saldanha *et al.*, 1980).

O grande pacote sedimentar dos tabuleiros corresponde a Formação Barreiras, de idade terciária, constituído por rochas clásticas continentais, ou seja, seixos e areias quartzosas de diversos tamanhos, com intercalações de argilas caulínicas e óxidos de ferro (Lima,1990). A drenagem que “corta” os sedimentos dessa formação forma, em geral, vales alongados de encostas abruptas (Schaller, 1969) que podem se abrir em compartimentos maiores na região do litoral alagoano, formando extensas lagoas como

por exemplo o Sistema Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (Nobre *et al.*, 2000). Cabe ressaltar que a deposição continental da Formação Barreiras, extensiva sobre toda a Bacia Sedimentar Alagoas-Sergipe, pode ser considerada um episódio independente, mas ligado a evolução da geomorfologia regional. No mapa de sub-afloramentos da discordância pré-Barreiras da **Figura 1**, são encontradas as formações relacionadas acima e seus respectivos membros. Verifica-se, na região em estudo, a predominância das formações Piaçabuçu (membro Marituba) e Muribeca. A formação Ponta Verde apresenta-se como uma espessa seção de folhelhos e, dessa forma, funciona como um importante aquitarde na região.

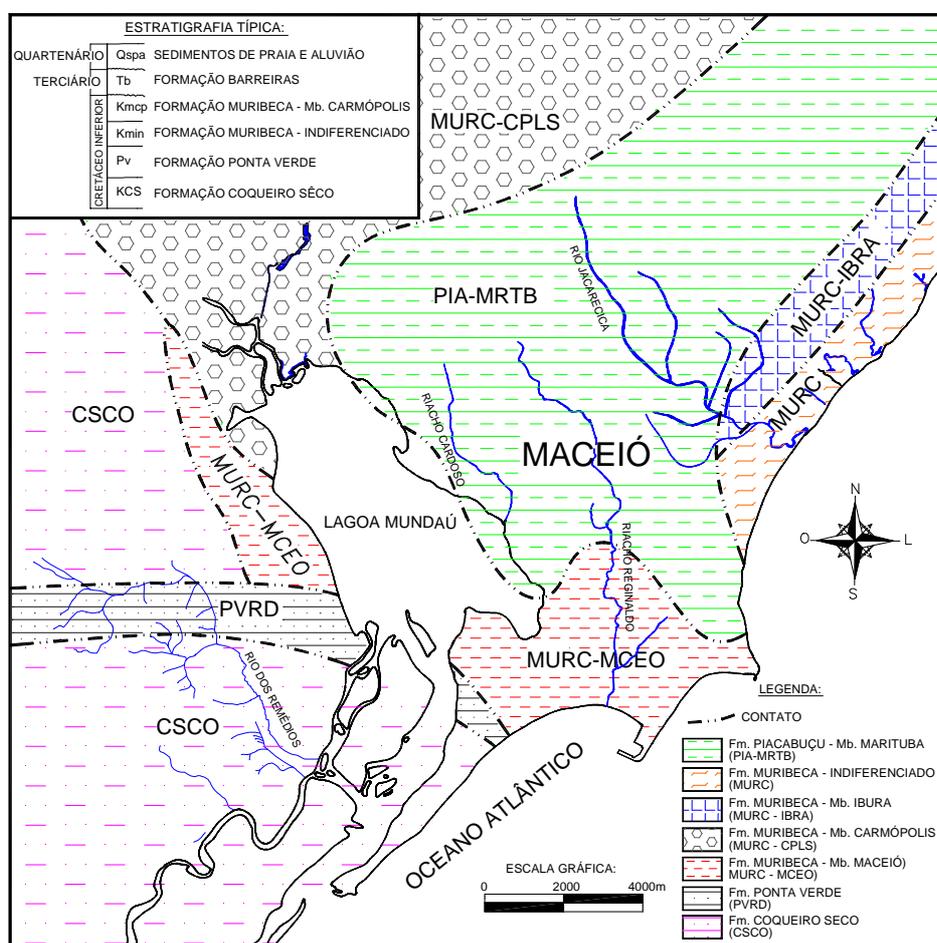


Figura 1.: Mapa de sub-afloramento da discordância pré-Barreiras

SISTEMA DE AQUÍFEROS BARREIRAS/MARITUBA

O sistema de aquíferos explorados na região metropolitana de Maceió é constituído pela formação Barreiras e pelo membro Marituba da formação Piaçabuçu. Essas formações apresentam grandes espessuras de arenitos e areias que deram origem a excelentes aquíferos na área da RMM. Na verdade, os dois horizontes acima funcionam,

sob o ponto de vista hidráulico, como um só sistema aquífero. As demais formações do pacote sedimentar apresentam potencialidades menores em termos de transmissibilidade de fluidos. Na região dos tabuleiros, a base da formação Barreiras encontra-se normalmente acima do nível do mar, e o aquífero apresenta-se parcialmente saturado. Nos baixos paleo-topográficos, entretanto, a discordância entre esta formação e as formações cretáceas atingem níveis de até -100 m (Saldanha *et al.*, 1980). Nessas regiões, o aquífero apresenta um melhor desempenho, pois seus sedimentos clásticos estão normalmente espessos e saturados. O aquífero Barreiras tem comportamento, em geral, livre e espessura homogênea, que pode alcançar até 150 m. Testes de aquífero convencionais realizados nesta formação revelaram valores de permeabilidade que variam entre 10^{-3} a 10^{-2} cm/s e coeficiente de armazenamento da ordem de 0,0001.

O membro Marituba da formação Piaçabuçu, constituído por areias grossas e calcários, ocorre principalmente na região dos tabuleiros, e encontra-se capeado pelos clásticos da formação Barreiras e, dessa forma, apresenta-se totalmente saturado. O sistema Barreiras/Marituba, constituído pelos dois horizontes permeáveis possui comportamento livre na zona superior e diversos horizontes confinados, com espessura que varia de 30 a 450 metros. As potencialidades hidráulicas verificadas são excelentes, com valores de permeabilidade que variam entre 10^{-3} a 10^{-1} cm/s. A recarga a este sistema aquífero faz-se através da infiltração direta a partir das precipitações, em particular na época de inverno. O membro Carmópolis da formação Muribeca constitui-se em um aquífero com menores potencialidades, constituído por conglomerados argilosos na região em estudo (Saldanha *et al.*, 1980).

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO REGIONAL DE FLUXO

Modelos de simulação e otimização de águas subterrâneas e de qualidade da água são representações matemáticas do sistema hídrico subterrâneo. O desenvolvimento e aplicação desses modelos é realizado através de várias etapas sequenciais e interdependentes, e faz uso, normalmente, de uma interface gráfica para o pré e pós processamento dos dados numéricos. Enquanto que os modelos de simulação podem determinar a resposta hidráulica do fluxo e transporte de contaminantes, considerando interferências como bombeamento ou recarga artificial, os modelos de otimização são aplicados na identificação de estratégias operacionais “ideais” para o planejamento integrado dos recursos hídricos. Em processos de gestão, entretanto, esses modelos deverão ser adotados, de forma conjunta, como ferramentas indispensáveis no processo

de previsão.

A modelagem numérica do fluxo de águas subterrâneas é multidimensional e deve ser baseada em informações geológicas, hidráulicas e geoquímicas do domínio. Na fase inicial do desenvolvimento do modelo, dados de bombeamento, amostras de sedimentos, perfis geofísicos, medidas de níveis estáticos dos aquíferos, hidrografia e recarga são compilados e analisados, de forma determinística ou estocástica, para determinação dos prováveis parâmetros hidráulicos do sistema. As condições de contorno a serem utilizadas no modelo são definidas conforme a área a ser estudada e os objetivos da simulação. De preferência, as fronteiras laterais do domínio deverão constituir em elementos hidrográficos naturais (Bear e Verruijt, 1990; Huyakorn e Pinder, 1983). Com base nessas informações preliminares, um modelo matemático deverá ser escolhido e aplicado, de forma a representar, da melhor forma possível, as condições hidrogeológicas específicas da área em estudo.

A modelagem das águas subterrâneas envolve, em sua essência, cinco fases distintas que permitem, de forma sistemática, uma aproximação adequada do sistema real. Estas fases incluem a) compilação das informações históricas; b) levantamento dos dados de campo; c) seleção e implementação do modelo; d) calibração do modelo; e) aplicação para diversos usos. Na implementação do modelo desenvolvido neste trabalho, condições permanentes de fluxo foram assumidas para a resolução das equações diferenciais de fluxo. Durante a fase de levantamento de dados de campo, foi considerado, apenas, uma parte do total de poços perfurados na região de Maceió, tendo em vista a não disponibilidade de dados sobre os demais poços particulares executados na cidade.

O domínio regional do modelo compreende uma área de aproximadamente 150 km² e foi discretizado, inicialmente, em células de 100x100m de área, formando a malha regular de diferenças finitas da **Figura 2**. Após a implementação das condições de contorno no domínio, as células mais externas se tornaram inativas. A elaboração da malha só foi processada após a definição do contorno físico do domínio, incluindo elementos hidrogeológicos naturais.

O domínio vertical foi discretizado em três camadas, sendo as três camadas aquíferas representadas pelo aquífero da formação Barreiras (camada 1), pelo sistema Barreiras/Marituba (camada 2), e pelo aquífero da formação Muribeca (camada 3). As camadas 2 e 3 encontram-se abaixo da cota do nível do mar, e estão totalmente saturadas. Os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos foram obtidos através de alguns

testes de aquífero convencionais já realizados.

As condições de contorno estão também representadas na **Figura 2**. O modelo foi alimentado com valores conhecidos de carga hidráulica para zonas de recarga (Ω_2), bem como fronteiras naturais de contato do domínio, como a orla litorânea (Ω_4), e o contorno leste da lagoa Mundaú (Ω_6), correspondente à condição de contorno do 1º tipo. As fronteiras Ω_1 , Ω_3 e Ω_5 , coincidente com algumas linhas de fluxo correspondem, no modelo de fluxo, a uma condição de contorno do 2º tipo. Foram adotadas, nesta fase inicial, as mesmas condições de contorno para as três camadas. Os riachos Reginaldo, Jacarecica e Cardoso foram simulados através da atribuição de níveis aproximados de suas águas.

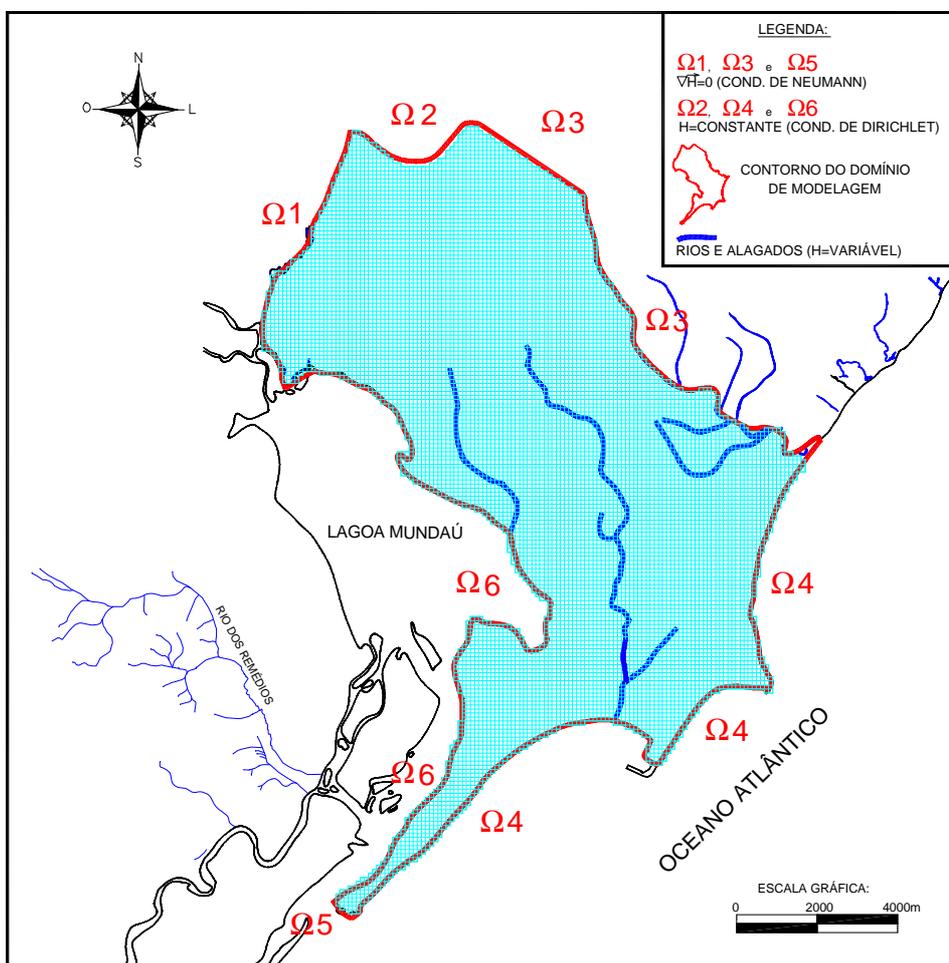


Figura 2. Malha de Diferenças Finitas e Condições de Contorno

A **Figura 3** ilustra a localização dos poços tubulares considerados no modelo (azul), bem como a localização de algumas fontes potenciais de contaminação tais como lixões, postos de gasolina e cemitérios (vermelho). Verifica-se que muitas das fontes poluentes estão inseridas nas zonas de captura dos poços de extração, o que ratifica a necessidade

de planejamento do uso e proteção de águas subterrâneas para uma gestão adequada. A recarga ao aquífero processa-se através da infiltração direta a partir das precipitações e, em menor escala, por contribuição dos rios. Foi adotada uma recarga média anual igual a 510 mm, considerando uma taxa de 30% de infiltração. Análises de sensibilidade estão sendo conduzidas para verificação da resposta do modelo face a diferentes valores de recarga.

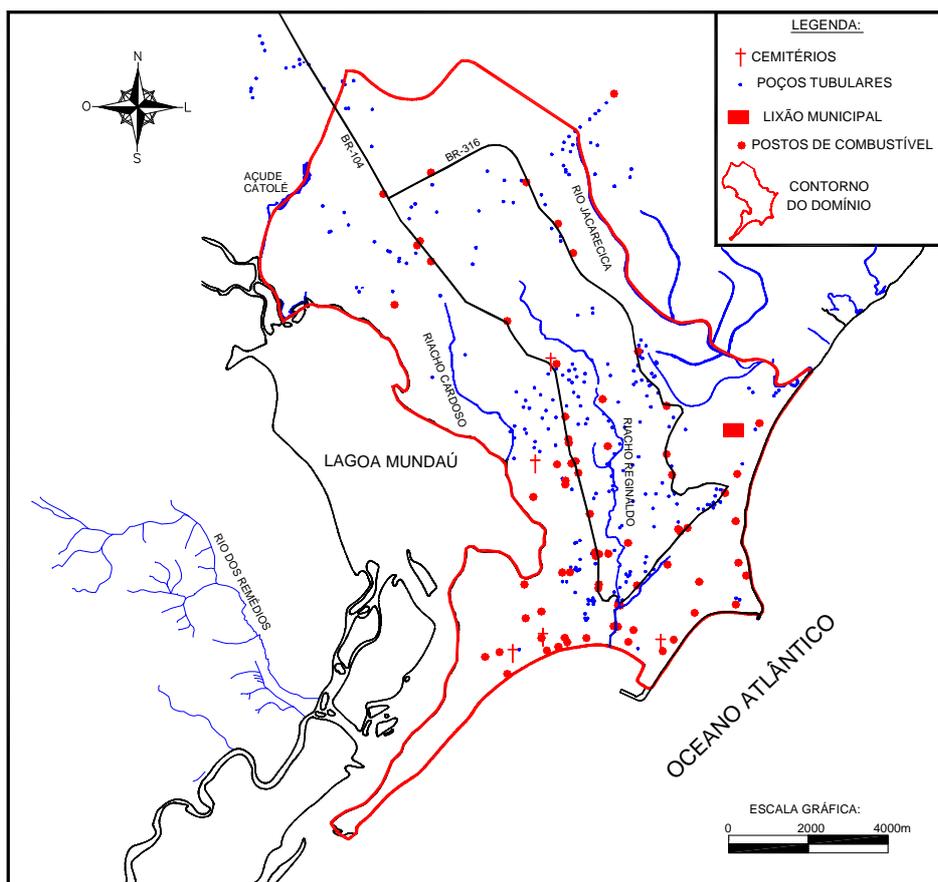


Figura 3. Localização dos poços tubulares e de fontes poluentes

O modelo foi alimentado com dados de alguns poços particulares bem como alguns fornecidos pela companhia de abastecimento de água do Estado (CASAL). Foram assumidos, em alguns casos, dados complementares como níveis do terreno, localização de filtros e vazões, devido a inexistência dos mesmos nos relatórios disponíveis de várias empresas perfuradoras. No total foram fornecidos ao modelo, até o momento, dados de cerca de 250 poços, o que representa, apenas, uma parte do total de águas extraídas do subsolo em Maceió. Este modelo poderá ser, entretanto, continuamente calibrado a medida que os dados dos demais poços sejam incorporados.

A simulação do modelo de fluxo, sob regime de fluxo permanente, tem como

vazões do modelo, como já mencionado, são inferiores à condição atual de exploração.

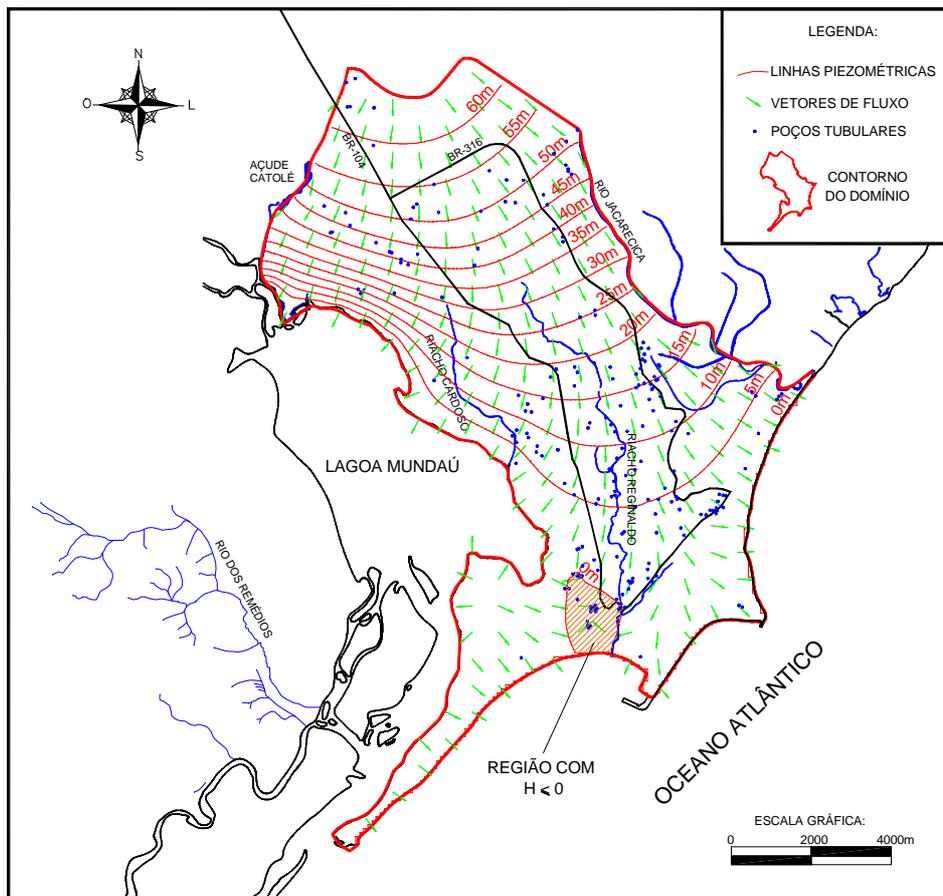


Figura 5. Potenciometria do sistema aquífero Barreiras/Marituba (camada 2)

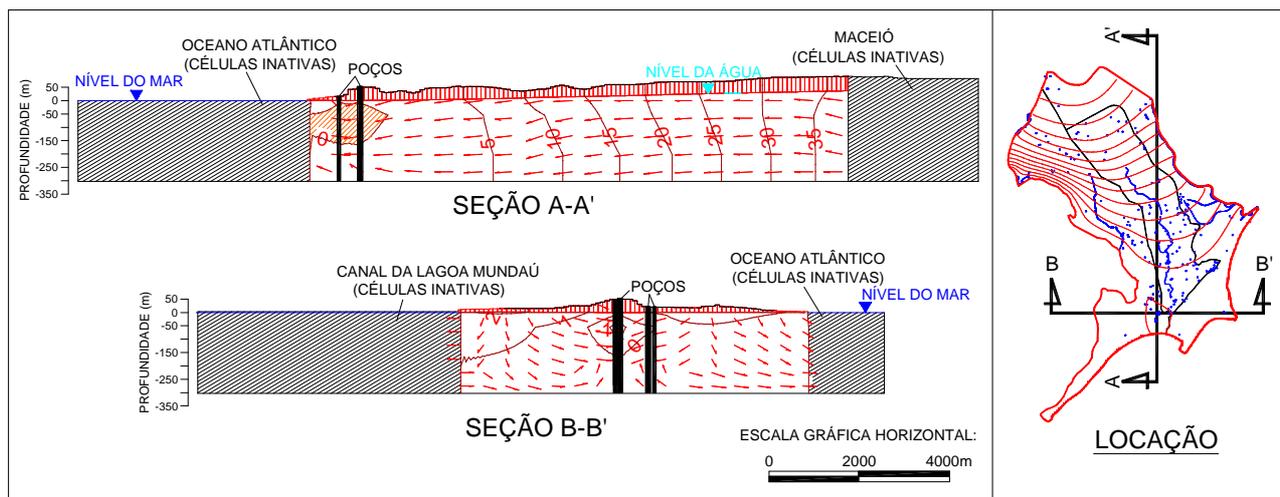


Figura 6. Seções verticais do domínio: potenciometria e vetores de velocidade

BALANÇO HÍDRICO

As reservas exploráveis (ou periódicas) do sistema de aquíferos Barreiras/Marituba

da RMM são formadas a partir da infiltração direta das precipitações na zonas de recarga da bacia sedimentar. Esta reserva pode ser também obtida através do estudo da flutuação média anual do nível do lençol freático. A extração das águas para múltiplos usos deve ser, sempre que possível, inferior às reservas exploráveis do aquífero, de forma a manter suas reservas permanentes evitando problemas como subsidências e recalques diferenciais, além do esgotamento das águas do aquífero. Neste trabalho, foi realizada uma estimativa preliminar do balanço hídrico na região com dados disponíveis até o momento.

Considerando, como recarga do aquífero, um valor igual a 30% da precipitação total anual de 1670 mm, temos um valor infiltrado igual a 501 mm/ano. Para uma área total igual a 200 Km², o volume total infiltrado com origem nas precipitações é igual a 279.452 m³/dia. Considerando, ainda, que a urbanização na região metropolitana vem reduzindo a infiltração para cerca de 20% do total anual, como estimativa preliminar, temos um volume de recarga igual a 186.301 m³/dia.

O consumo de água na região metropolitana de Maceió foi estimado com base na avaliação dos dados fornecidos pela Companhia de Abastecimento de Água de Alagoas - CASAL. A vazão total e contínua extraída dos poços tubulares da CASAL é igual a 1,48 m³/s, sendo 0,5 m³/s com origem na bateria de poços do Reginaldo, 0,50 m³/s da área do Bebedouro e 0,46 m³/s dos demais poços isolados (CASAL, comunicação pessoal). Este valor corresponde a 74% do volume total de águas extraídas pela companhia, igual a 2,0 m³/s, incluindo águas de superfície e águas subterrâneas. Considerando que Maceió deve possuir, ainda, cerca de 200 poços particulares espalhados pela cidade, e estimando uma vazão total de extração desses poços igual a 0,8 m³/s, temos, então, uma vazão total de extração do sistema aquífero de Maceió igual a 2,28 m³/s ou 196.992 m³/dia. Com esta estimativa, assume-se que 81% da água total consumida em Maceió provém dos mananciais hídricos subterrâneos.

Conforme os resultados do exercício realizado, verifica-se que a vazão total de produção através de poços tubulares, na região metropolitana de Maceió, já é superior a recarga, se considerarmos uma infiltração de 20% das precipitações. Isto significa que, em algumas áreas, tanto a reserva explorável quanto a reserva permanente já está sendo utilizada para fins de abastecimento. Isto justifica o fenômeno de salinização que já tem sido verificado em alguns poços na cidade, incluindo alguns afastados da orla marítima. É oportuno salientar, ainda, que a precipitação total ao longo dos últimos anos, na região de Maceió tem sido inferior ao total anual médio considerado neste trabalho.

Para uma vazão total de extração de águas subterrâneas igual a $2,28 \text{ m}^3/\text{s}$, temos um valor estimado igual $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$ de vazão total produzida na região metropolitana de Maceió, incluindo poços da CASAL, poços particulares, bem como águas de superfície (reservatórios do Catolé mais Aviação), para suprir o seu abastecimento. Considerando perdas da ordem de 50% (CASAL, comunicação pessoal), devido a manutenção precária da rede, tem-se, como vazão total efetiva, ou seja, aquela efetivamente utilizada pela população, um valor igual a $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $120.960 \text{ m}^3/\text{dia}$. Isto implica em um consumo efetivo per capita, em Maceió, igual a 157 l/hab/dia , considerando uma população total igual a 770.000 habitantes.

SALINIZAÇÃO DO AQUÍFERO COSTEIRO

O estudo e conhecimento das relações entre água doce e água salgada em regiões costeiras são revestidos de grande interesse tendo em vista que muitos aquíferos nessas áreas constituem-se em mananciais estratégicos para abastecimento futuro de água para as diversas atividades humanas. De fato, a perda de qualidade desses mananciais, em função do incremento dos teores de cloretos provocado por falta de um gerenciamento adequado, é muito comum em regiões costeiras. O fluxo de água doce, em condições naturais, encontra-se normalmente em estado de equilíbrio onde o oceano se constitui na zona preferencial de descarga hidráulica. Este equilíbrio só é alterado quando ocorrem mudanças climáticas ou interferências externas.

No caso em estudo, com o bombeamento elevado na faixa litorânea na cidade de Maceió, a zona de captura do sistema de poços deve já ter atingido, em algumas áreas, a interface de água doce/salgada. A verificação de águas com elevado teor de cloretos em diversos poços tubulares na faixa costeira, e até mesmo em muitos poços construídos no bairro do Farol, ratifica a ocorrência de processos de intrusão marinha. É necessário, então, que sejam estabelecidas as condições de exploração para que tal ascensão de sal não afete as captações. Ademais, a impermeabilização das zonas de infiltração na cidade e obras de engenharia estão também contribuindo para uma modificação das relações naturais entre águas doces e águas salgadas.

O avanço indesejável da cunha salina pode ser limitado através de obras de engenharia como implementação de barreias físicas, hidráulicas (recarga artificial), ou a relocação dos centros de bombeamento (p.e., Custódio e Llamas, 1983; Munevar e Marino, 1999). Cada um desses métodos tem características funcionais próprias para as

circunstâncias determinadas. No caso específico de Maceió, qualquer medida corretiva a ser adotada deve ser fundamentada no conhecimento preliminar dos atuais volumes da captação, incluindo poços particulares e da CASAL, bem como a qualidade das águas desses poços, para diferentes profundidades, determinada através de métodos analíticos. Cabe ressaltar, ainda, que modelos numéricos adicionais estão sendo considerados para a simulação dos efeitos de processos de intrusão marinha, como é tratado, por exemplo, em Robinson e Gallagher (1999), tendo em vista que o modelo de fluxo adotado neste trabalho não leva em consideração os efeitos da variação de densidade do fluido. Com isso, é possível definir as estratégias de gestão do aquífero costeiro de Maceió, estabelecendo, assim, os critérios de exploração aceitável na faixa litorânea.

CONCLUSÕES

A modelagem do fluxo de águas subterrâneas e do rastreamento de partículas evidenciaram a importância da utilização dessas “ferramentas” numéricas na previsão daqueles fenômenos em meios porosos com o objetivo de um gerenciamento otimizado dos recursos hídricos na Região Metropolitana de Maceió. Neste trabalho, foi concebido um modelo numérico preliminar da área em estudo que poderá ser bastante útil na previsão do comportamento do manancial hídrico subterrâneo, face a possíveis configurações de bombeamento. Assim, foi iniciada, de forma pioneira, uma avaliação sistêmica da questão dos recursos hídricos na RMM. Análises de sensibilidade do modelo implementado, bem como o refinamento da malha numérica, poderão ser conduzidos numa segunda etapa do trabalho, quando da obtenção de maior quantidade de dados.

Com base nos resultados de simulação, utilizando-se uma parte do total de poços tubulares existentes na cidade, foi verificado que o sistema de aquíferos explorado na região está sofrendo alterações significativas do ponto de vista hidráulico e qualitativo. Um total aproximado de 2,28 m³/s de águas são extraídas continuamente e correspondente a cerca de 81% do suprimento de água em Maceió. O balanço hídrico anual realizado revelou que este volume total, já é superior a recarga anual. Com perdas da ordem de 50%, calcula-se um consumo efetivo per capita, em Maceió, igual a apenas 157 l/hab/dia. Assim, é imperativo que o regime de outorga de direitos de uso das águas subterrâneas, através da política estadual de recursos hídricos, seja regulamentado o mais rápido possível, possibilitando uma gestão mais otimizada e o uso sustentável dos mananciais hídricos existentes. Esta regulamentação, entretanto, deverá refletir conhecimentos técnicos específicos da área de estudo, a exemplo do que foi tratado

neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CASAL, pelas informações fornecidas, e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

- Bear, J. e Verruijt, A., 1990. *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Reidel Publishing Company, Holland, 414p.
- Custódio, E. e Llamas, M.R., 1983. *Hidrologia Subterrânea*, Vol. II. Omega Editores. 2308p.
- Huyakorn, P.S. e Pinder, G.F., 1983. *Computational Methods in Subsurface Flow*. Academic Press, Inc., London, 473p.
- Lana, M.C., 1990. Bacia de Sergipe-Alagoas: Uma hipótese de Evolução tectono-sedimentar. In: *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Petrobrás. 415 p.
- Lima, I.F., 1990. *Maceió, a Cidade Restinga – Contribuição ao Estudo Geomorfológico do litoral alagoano*. EDUFAL, 130 p.
- Munevar, A. e Marino, M.A., 1999. Modeling analysis of groundwater recharge potential on alluvial fans using limited data. *Groundwater*, Vol. 37, N.5, p.649-659.
- Nobre, R.C.M., Nobre, M.M.M. e Filho, O.C.R., 2000. Modelo de circulação hidrodinâmica aplicado ao Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba. *1º Congresso sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português*. Rio de Janeiro, 17-20 abril.
- Robinson, M.A. e Gallagher, D.L., 1999. A model of groundwater discharge from an unconfined coastal aquifer. *Groundwater*, Vol. 37, N.1, p.80-87.
- Saldanha, L.A.R., Cavalcante, A.T., Wanderley, P.R.M. e Rocha, F.C., 1980. Contribuição da geologia na qualificação de áreas para fins hidrogeológicos em Alagoas. *1º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Recife, PE, p.223-231.
- Schaller, H., 1969. *Revisão Estratigráfica da Bacia de Sergipe-Alagoas*. Boletim Técnico da Petrobrás, 12(1), p.21-86.