



Aspectos Hidrodinâmicos, Balanço Hídrico e Simulação de Fluxo no Aquífero Costeiro de Itaipuaçu, Maricá – Rio de Janeiro, Brasil
Hydrodynamic Aspects, Water Budget and Flow Simulation in the Coastal Aquifer of Itaipuaçu, Marica – Rio de Janeiro, Brazil

Glauco Zely da Silva Eger; Gerson Cardoso Silva Junior & Vinicius do Nascimento Cristo

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Departamento de Geologia - Laboratório de Hidrogeologia.*

Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Sala J0 - 05,

Cidade Universitária, Iha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil 21941-916

E-mails: glaucoeger@geologia.ufrj.br; gerson@acd.ufrj.br; viniciuscristo@geologia.ufrj.br

Recebido em: 10/09/2013 Aprovado em: 02/10/2013

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2013_2_105_116

Resumo

O presente estudo foi realizado no aquífero costeiro de Itaipuaçu, distrito de Maricá, Rio de Janeiro. Este aquífero é de muita importância para a região, pois ainda é o único meio de abastecimento de água para uma população crescente. A utilização deste recurso hídrico sem controle é um dos seus maiores problemas, porque sua qualidade pode ser prejudicada por contaminações oriundas da superfície e, por se tratar de um aquífero costeiro, essa superexploração pode gerar migração da interface entre a água salgada/água doce em direção ao continente podendo salinizá-lo.

O trabalho tem como objetivo apresentar as características hidrodinâmicas do aquífero freático da área de estudo, por meio de avaliação do fluxo local, dos parâmetros de fluxo do aquífero, aquisição e processamento de dados meteorológicos e balanço hídrico do sistema aquífero, com a aplicação no programa Visual BALAN V.2.0. Outras metodologias de cálculo foram empregadas como o balanço hidrometeorológico simplificado (programa Easybal v.4) e balanço hídrico com emprego da Lei de Darcy.

Perfuraram-se poços no aquífero raso da área de estudo, com os quais foi realizado o levantamento da estratigrafia local, além de um teste de interferência para a obtenção de parâmetros físicos do aquífero (permeabilidade e coeficiente de armazenamento). Foram realizadas medidas *in situ* dos níveis d'água em poços na região para obter a potenciometria do aquífero raso. Os dados indicam um baixo gradiente hidráulico e equipotenciais subparalelas a linha de costa. Com base nos parâmetros hidráulicos foram realizadas simulações de fluxo com o software Visual Modflow 4.2. Os resultados obtidos até à data indicam uma recarga de cerca de 36% da precipitação e um gradiente hidráulico inferior a 1%. A obtenção de parâmetros do aquífero *in situ* foi fundamental para o ajuste adequado do modelo e avaliação das propriedades do aquífero local.

Palavras-chave: Hidrodinâmica; Balanço Hídrico; Simulações de Fluxo

Abstract

This research was conducted in the coastal aquifer of Itaipuaçu district, Marica, Rio de Janeiro in Brazil. This is an aquifer of great importance for the region, as it is still the only autochthonous means of water supply for a growing population. The use of this water resource without control is a big problem, because quality can be impaired by contamination coming from the surface and, as a coastal aquifer, overexploitation can generate migration of saltwater / freshwater interface towards mainland and can salinize it.

The paper aims to present the hydrodynamic characteristics of the shallow aquifer of the study area, by assessing local flow, flow parameters of the aquifer, acquisition and processing of meteorological data and water balance of the aquifer system, with the application of Visual Balan V.2.0 code. Other calculation methodologies were employed, as hydrometeorological simplified balance (Easybal v.4 computer code) and water balance with use of Darcy's Law.

Wells were drilled in the shallow aquifer of the study area to assess local stratigraphy, and interference tests were performed to obtain physical parameters of the aquifer (permeability and storage coefficient). *In situ* measurements of water levels in wells were performed in the region to map the shallow aquifer head distribution. The data indicate a low hydraulic gradient and equipotential lines subparallel to the shoreline. Based on the hydraulic parameters, flow simulations were performed with the software Visual Modflow 4.2. The results obtained to date indicate a recharge of about 36% of the precipitation and hydraulic gradient less than 1%. Obtaining *in situ* parameters of the aquifer was crucial for the proper model fit and evaluation of the local aquifer properties.

Keywords: Hydrodynamic aspects; Water Budget; Flow Simulation

1 Introdução

A área costeira do Estado do Rio de Janeiro tem sofrido nos últimos anos 20 anos um rápido, e muitas vezes desordenado, crescimento imobiliário, principalmente na área do litoral a Leste da capital Fluminense. Esse crescimento tem exigido uma maior demanda de água potável, recurso natural vulnerável e finito, e a não existência de fontes alternativas de abastecimento tem gerado uma pressão sobre os aquíferos costeiros, devido a elevadas taxas de exploração (Lowsby & Alves, 2000). O Distrito de Itaipuaçu, no município de Maricá – RJ, tem passado por uma acelerada expansão da atividade imobiliária. Esta expansão não vem acompanhada de planejamento ou ação consonante do poder público. Desta forma, o recurso hídrico subterrâneo é, ao menos até o final ano de 2013 (quando prevê-se chegada da rede de distribuição para abastecimento de água e serviço de esgoto no Distrito de Itaipuaçu), o único meio de abastecimento de água para a população do distrito, sem que haja nenhum tipo de planejamento quanto à exploração dos aquíferos, ou ação apropriada de gestão do mesmo. A exploração do aquífero local tem sido crescente para atender a demanda de residências e do comércio local. Isso pode contribuir para uma superexploração, em que a taxa de extração de água de um aquífero é igual ou maior a taxa de recarga ao mesmo (Custodio, 2002). O problema também é causador da salinização do aquífero devido à intrusão da água do mar em aquíferos costeiros, coincidentemente o caso da área do presente estudo. Para a boa gestão de recursos hídricos de uma determinada área, como no caso da área de Itaipuaçu, é fundamental uma estimativa fiável do balanço hídrico (Crosbie *et al.*, 2010), o que se buscou obter na área de estudo.

O estudo e a busca pelo entendimento do complexo fenômeno da recarga aos aquíferos é de fundamental importância em diferentes áreas da atividade humana, como gestão de recursos hídricos, abastecimento urbano, agricultura, etc. A literatura ressalta a importância do entendimento do processo e da avaliação do volume de recarga ao aquífero em diferentes escalas (Todd & Mays, 2005; Vries & Simmres, 2002; Scanlon *et al.*, 2002).

Uma importante ferramenta de auxílio na fase de planejamento do processo de gestão de recursos hídricos subterrâneos é a modelagem matemática. Os modelos matemáticos empregam uma equação ou uma série de equações que simulam e preveem respostas físico-químicas de um aquífero sujeito a perturbações, tais como poços de injeção ou

extração ou a migração de um resíduo tóxico (Cleary, 1991). Estes modelos auxiliam no gerenciamento dos recursos hídricos. A utilização de códigos numéricos de fluxo e transporte para a avaliação de comportamento e auxílio à gestão de aquíferos costeiros é ainda praticamente inexistente no Brasil.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o estudo hidrodinâmico do aquífero da planície costeira da Itaipuaçu, com o cálculo do balanço hídrico do aquífero local (aplicando diferentes metodologias de cálculo do Balanço Hídrico, como: balanço de cloretos, aplicação da lei de Darcy e modelo de balanço hidrometeorológico simplificado e com Visual Balan) e a formulação de um modelo conceitual de funcionamento do aquífero para aplicação em uma simulação matemática de fluxo com *Visual MODFLOW*. Os resultados da simulação numérica foram comparados aos dados de balanço hídrico.

Para obter-se tal objetivo, realizou-se uma sequência de ações, descritas no capítulo 4, destinadas a elaboração de uma modelagem visando a compreensão da circulação e destino das águas subterrâneas locais e validação das demais elaborações (modelo conceitual).

2 Caracterização da Área de Estudo

2.1 Localização

Itaipuaçu está situado a aproximadamente 60 km da capital do estado do Rio de Janeiro e, juntamente com os distritos de Inoã, Maricá (Centro) e Ponta Negra, faz parte do município de Maricá. A área estudada possui cerca de 30 km², compreendendo os depósitos sedimentares costeiros do litoral leste do estado do Rio de Janeiro, coincidindo com parte da região designada como Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Figura 1).

2.2 Caracterização Geológica

Em termos regionais, o litoral do município de Maricá, onde esta inserida a área de estudo, faz parte de um complexo geológico representado por duas unidades geológicas principais: uma composta por rochas cristalinas, onde se observam as maiores elevações, e uma unidade sedimentar, que forma a

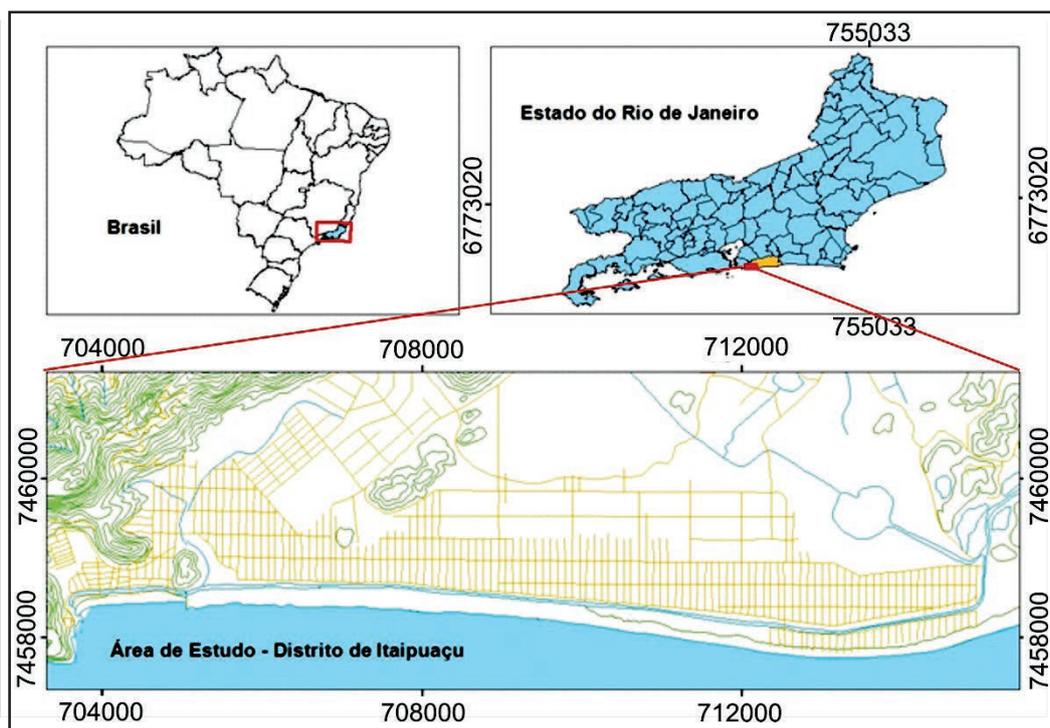


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo em Maricá, Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

planície costeira. O distrito de Itaipuaçu localiza-se geologicamente no limite entre dois domínios tectono - magmáticos, o Domínio Serra do Mar e o Domínio Região dos Lagos.

As Planícies Costeiras apresentam uma tendência de aumento de área na direção leste, formando no contato oceano-continente, extensos arcos de praia. São compostos por cordões litorâneos, que correspondem ao substrato geológico no qual estão inseridos os aquíferos estudados na presente pesquisa. Estes compõem um complexo de ambientes deposicionais, constituído por depósitos flúvio-lagunares e depósitos praias marinhas e/ou lagunares (Figura 2).

2.3 Caracterização Hidrogeológica

Em Itaipuaçu, o domínio hidrogeológico foi reconhecido como um sistema com aquíferos sedimentares granulares, que compreendem depósitos aluvionares costeiros heterogêneos e porções de solo e rocha alterada. Esses sedimentos aluvionares são compostos predominantemente por areias quartzosas, localmente com camadas siltsosas e argilosas, que ocorrem nas proximidades das lagunas, decorrentes da formação da baixada litorânea durante os últimos movimentos de transgressão e regressão no Holoceno, entre 5000

e 7000 anos atrás (Pereira *et al.*, 2003; Almeida & Silva Jr., 2007).

O nível d'água na região é geralmente raso, variando em média de 2 a 8 m de profundidade. Os poços de abastecimento da área estão em geral no aquífero raso, com profundidades médias de 12 metros. Em algumas localidades da área (p.ex.: após o canal, próximo a praia), esse aquífero não apresenta boa qualidade, pois sua água possui elevada salinidade e forte cheiro de compostos de enxofre. Neste perímetro há poços de cerca de 40 metros de profundidade, que exploram de um aquífero mais profundo. Estes poços, apesar de sua profundidade e proximidade com o mar, possuem uma água de boa qualidade química. Fatores estratigráficos e estruturais condicionam a distribuição da salinidade das águas subterrâneas locais, de qualidade bastante variada.

O aquífero livre da área estudada, devido a pouca profundidade do nível d'água nos cordões arenosos, em conjunto com a densa urbanização local, é vulnerável a alterações químicas e à contaminação. As áreas próximas às lagunas estão sujeitas à oscilação das marés e inundações periódicas em função de chuvas intensas; em muitos casos, as fossas sépticas ou sumidouros, construídos sem orientação técnica adequada, encontram-se muito próximos aos poços e os resíduos oriundos destas comunicam-se diretamente com a água que

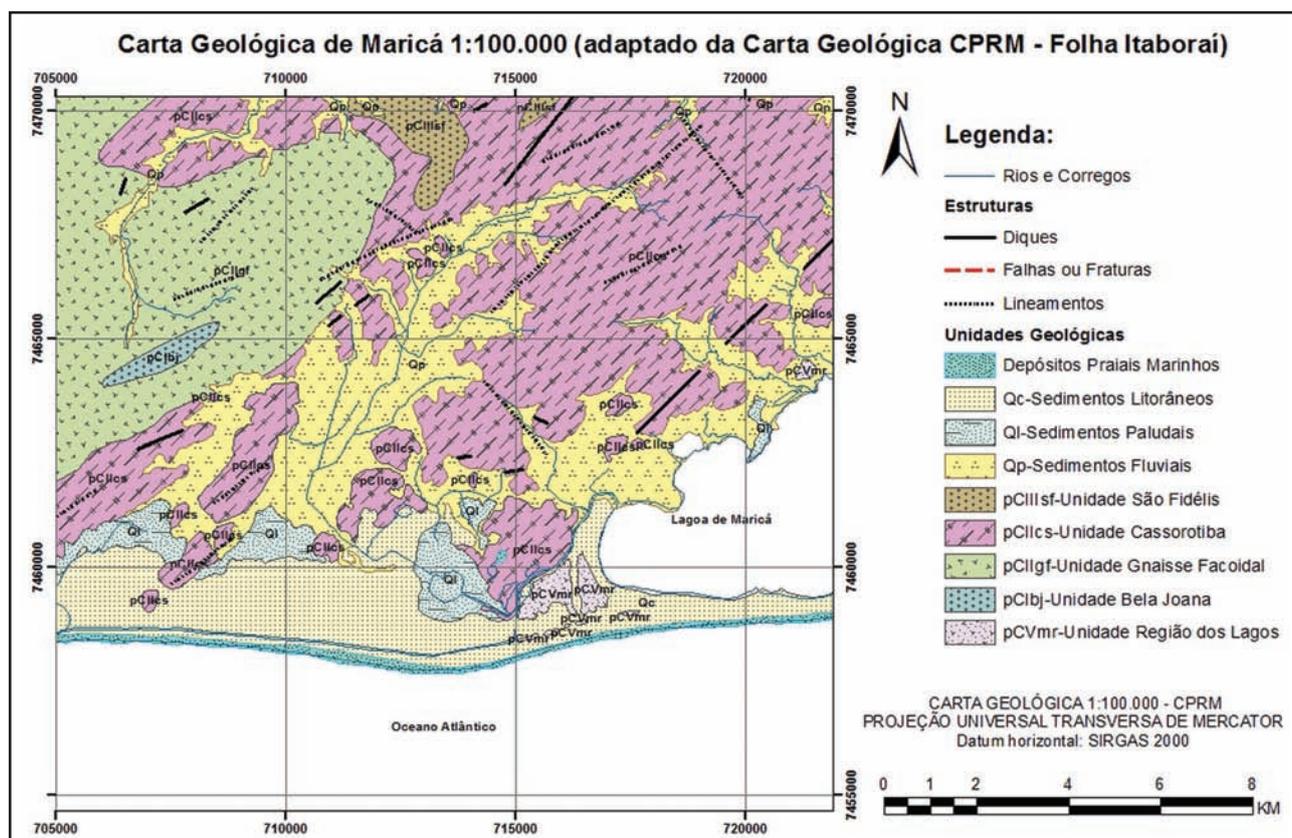


Figura 2 Mapa geológico de Maricá/Itaboraí 1:100.000 (adaptado de CPRM – Folha Itaboraí 2012).

circula livremente pelos interstícios dos sedimentos (Almeida, 2009; Seabra *et al.*, 2009).

2.4 Clima

Na Baixada Litorânea, local da área de estudo, ocorre clima quente e úmido sem inverno pronunciado, com chuvas no verão e estiagem no inverno, com pouco mais de 1300 mm de precipitação média anuais. Possui temperaturas médias regularmente elevadas e suas variações são pequenas, oscilando entre 22 e 23°C (CIDE, 1998).

3 Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho pode ser dividida em: 1) levantamento e análise da base de dados pré-existente da área; 2) campanhas de campo para levantamento de dados hidrogeológicos, topográficos, etc.; 3), elaboração de tabelas, mapas e gráficos; finalmente, 4) comparação e análise dos dados obtidos, através de simulações de fluxo e balanço hídrico.

A base de dados pré-existente é composta por trabalhos anteriormente realizados pelo Laboratório de Hidrogeologia – UFRJ, no âmbito de projetos antigos, além de documentos, mapas (geológicos e topográficos) e perfis realizados em pesquisas de outros órgãos governamentais (ex. IBGE, INMET, ANA), armazenados no laboratório (Silva Jr., 2005).

Durante as campanhas de campo foram realizadas medições periódicas do nível estático com um medidor de nível eletrônico. Realizou-se um levantamento topográfico pelo método DGPS, a fim de obter um nivelamento da boca dos poços, dos quais foram levantados os níveis freáticos, para assim definir a superfície potenciométrica do aquífero.

Os dados topográficos foram aplicados no *Software ArcGis 9.3* da ERSI, no qual foi gerado um mapa, e no *Visual MODFLOW v.4.2*, onde foi interpolado pelo método de diferenças finitas, possibilitando um modelo tridimensional aplicado na simulação.

No âmbito do projeto Hidroq-Rio FAPERJ (Cristo & Silva Jr., 2011) foram perfurados dois

poços de monitoramento (pontos 27 e 52, ambos com 12 m de profundidade) que, que ajudaram a compor as informações já existentes possibilitando uma análise da estratigrafia local. Com o objetivo de obter parâmetros hidráulicos do aquífero, foi realizado um teste de interferência entre dois poços (Poços 26 e 27). O Poço 26 foi bombeado por um determinado período a uma vazão conhecida, e o nível medido por um *Diver*[®] (*datalogger* para o nível d'água e a salinidade) da Schlumberger Water Service, instalado no Poço 27. Para obtenção dos valores de Transmissividade e Armazenamento foi utilizado o *software Aquifer Test*[®] da Schlumberger Water Service, no processamento dos dados registrados durante o teste.

Realizou-se o Balanço Hídrico do aquífero costeiro de Itaipuaçu (Equações 1, 2 e 3). Esta metodologia obedece ao princípio da conservação das massas, em que as diferenças entre as entradas (E) e saídas (S) em um aquífero são iguais a variação de armazenamento (ΔS) dentro do aquífero (CPRM, 2000).

$$\Delta S = E - S \quad (1)$$

Onde: E são as entradas; e S as saídas, e:

$$E = P + Q_{se} + Q_{te} \quad (2)$$

$$S = ETR + Q_{ss} + Q_{ts} \quad (3)$$

Onde:

P = precipitação; Q_{se} = vazão superficial de entrada; Q_{te} = vazão subterrânea de entrada; ETR = evapotranspiração real; Q_{ss} = vazão superficial de saída; Q_{ts} = vazão subterrânea de saída.

Para aplicação do método do Balanço Hídrico foi utilizado o *software Visual Balan v2.0* (Samper *et al.*, 1999; Espinha Marques *et al.*, 2006). Trata-se de um código hidrológico de parâmetros agregados, desenvolvido especialmente para a estimação dos recursos hídricos. O programa resolve as equações do balanço hídrico no solo superficial, zona não saturada pendular e no aquífero, estimando as componentes de maneira sequencial (Figura 3).



Figura 3 Esquema hidrológico adotado pelo Visual Balan (adaptado de Samper *et al.*, 1999).

A fim de comparar os resultados do *Visual Balan* com outras ferramentas de estimativa de Balanço Hídrico, foram aplicadas outras metodologias como: Estimativa de Recarga pela Lei de Darcy, Balanço Hidrometeorológico Simplificado e Balanço de Cloretos.

A Estimativa de Recarga pela Lei de Darcy é a aplicação da lei de Darcy objetivando uma avaliação da massa de água subterrânea circulante em todo aquífero (Equação 4).

$$Q = K \times i \times A \quad (4)$$

Onde: Q é a vazão [m^3], i é o gradiente hidráulico (obtido com base no mapa potenciométrico traçado manualmente), K é condutividade hidráulica (obtida no teste de bombeamento) [m/s] e A é a Área da seção (comprimento x espessura do pacote) [m^2].

O Balanço Hidrometeorológico Simplificado: neste método obteve-se o volume de recarga referente ao aquífero pelo processamento de dados climatológicos da área (precipitação e temperatura), no *software Easy Bal v4.0*. A partir da porcentagem de recarga anual e do volume precipitado calcula-se o armazenamento (Equação 5).

$$\Delta S = P \times R \times A \quad (5)$$

Onde P é a precipitação anual média [mm], R é a porcentagem média de recarga e A é a área superficial do aquífero [m^2].

Para o cálculo da precipitação foram utilizados os bancos de dados do INMET- BDMEP e ANA-

HidroWeb. Esses dados foram a fonte de informações para a estimativa da recarga média anual.

O **Balanço de Cloretos** é uma metodologia de estimativa de recarga pela razão entre os valores médios do íon cloreto em amostras de água da chuva e do aquífero coletadas e analisadas por esse estudo. O íon cloreto tem um caráter conservativo, o que permite através de sua análise, estimar a recarga (Equação 6).

$$R = \frac{Cl^-_{ch}}{Cl^-_{aq}} \quad (6)$$

Onde:

R = % recarga ao aquífero; $[Cl^-]_{ch}$ = cloretos na precipitação e $[Cl^-]_{aq}$ = cloretos no aquífero.

A compilação de todos esses dados permitiu a elaboração de um modelo hidrogeológico do aquífero costeiro de Itaipuaçu, possibilitando uma simulação de fluxo em regime estacionário com o *software* Visual MODFLOW v.4.2, para o sistema aquífero.

O Visual MODFLOW (Guiguer & Franz, 1998) é uma interface gráfica do MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988), composto de códigos, em forma modular, que solucionam os problemas de fluxo tridimensionalmente, em diferenças finitas implícitas, com bloco de nó centralizado. A preparação do modelo pode ser dividida nas seguintes etapas:

- Levantamento de campo: Nesta etapa constam as atividades anteriormente descritas (levantamento de parâmetros hidrodinâmicos e balanço hídrico).
- Elaboração de um modelo conceitual.

O modelo hidrogeológico conceitual foi elaborado com base na compilação e interpretação de informações já existentes na bibliografia e base de dados no Laboratório de Hidrogeologia, acrescidas de dados obtidos nas campanhas de campo.

- Simulação de fluxo no Visual MODFLOW

A simulação é realizada pela equação diferencial, baseada na lei de Darcy e na lei de Conservação de Massas, representando o escoamento da água no meio aquífero saturado, tridimensional (Equação 7):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (7)$$

Na qual:

K_x , K_y e K_z são os componentes do tensor de condutividade hidráulica nas dimensões x , y e z ; h é a carga hidráulica; t é o tempo; S_s representa o armazenamento específico no meio poroso; e R^* representa um ponto onde a água é retirada (sumidouro) ou introduzida (fonte) ao sistema por unidade de volume do meio, com valor positivo se for referente à introdução e negativo se for referente à retirada [T^{-1}].

4 Resultados e Discussões

Realizou-se o cadastro de 56 pontos de observação (poços e corpos d'água superficiais), incluindo amostras superficiais da água da região, dos quais em 24 poços foram realizadas medidas de níveis freáticos.

4.1 Topografia e Nivelamento de Poços

Para definir a superfície potenciométrica do aquífero, foi realizado o nivelamento dos poços utilizando o método DGPS. Primeiramente foram geradas as Altitudes Ortométricas com base no modelo geoidal, e posteriormente foram calculados os níveis d'água (Figura 4).

4.2 Estratigrafia

Foi executado um conjunto de poços com a finalidade de proporcionar informação estratigráfica ao projeto (Figura 5). A correlação dos dados gerados com trabalhos anteriores permitiu correlacionar espacialmente os poços com os cordões arenosos, segundo o modelo conceitual disponível (Pereira *et al.*, 2003).

Este estudo possibilitou sugerir que o poço ACOST-Rio secciona o cordão litorâneo arenoso do Pleistoceno em seu topo, as camadas de lamelas e areias lacustres em sua parte mediana, e por fim as areias fluviais Pleistocênicas. O poço HIDROQ-Rio 1, está inserido no cordão litorâneo arenoso Pleistocênico (interno), sendo a intercalação de argila arenosa e areia argilosa correlacionada com os sedimentos lacustres. Os sedimentos amostrados no poço HIDROQ-Rio 2, indicam

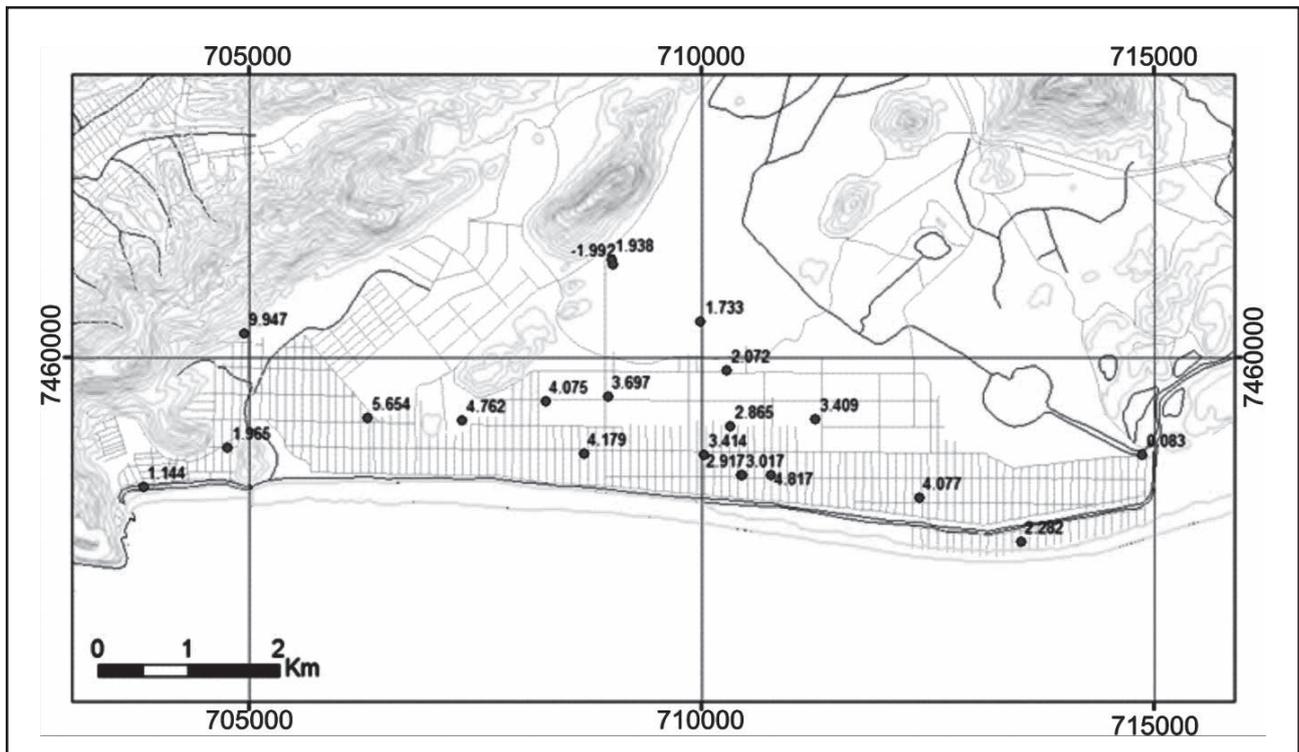


Figura 4 Mapa de poços da área de estudo em Maricá – Estado do Rio de Janeiro, Brasil com cotas de Níveis Estáticos em metros.

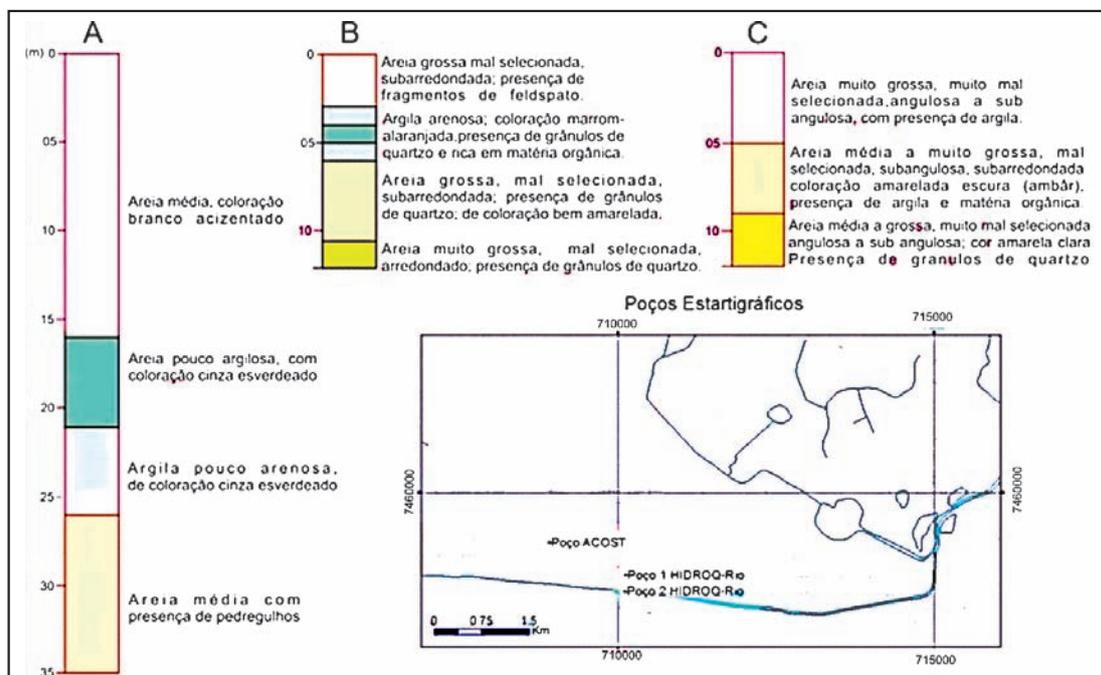


Figura 5 Localização dos Poços Estratigráficos (A-Poço ACOST-Rio; B-Poço 1HIDROQ-Rio; C-Poço 2HIDROQ-Rio).

que este localiza-se no cordão litorâneo externo de idade holocênica. Os resultados confirmam o modelo previamente sugerido para a planície de Itaipuaçu (Pereira *et al.*, 2003), com uma deposição de materiais predominantemente arenosos, de grão médio a grosso, mal selecionado, intercalado por

níveis pouco potentes de argila arenosa. Tais níveis podem atingir espessuras métricas e eventualmente funcionar como camada confinante do aquífero inferior, que eventualmente preserva características da área de recarga mais distante, de águas doces, conforme observado em pontos na zona de praia.

4.3 Balanço Hídrico

4.3.1 Visual Balan

A modelagem hidrológica no *Visual Balan* v2.0 foi realizada utilizando-se uma série de precipitações compreendidas entre o período de 1993 e 2012, somando 19 anos hidrológicos. Os dados adquiridos durante o andamento da pesquisa serviram como base para o cálculo, juntamente com os conhecimentos obtidos em outros projetos pelo Laboratório de Hidrogeologia – UFRJ (Tabela 1).

A precipitação anual média foi de 1396 mm, sendo este o principal recurso de entradas (E) para o aquífero. Adotou-se uma interceptação nula, partindo do princípio de que devido à falta de redes de drenagem fluvial e de esgoto, a água que escoava dos telhados é lançada no solo e evaporada ou infiltrada. A partir destes dados, foram calculados os valores de Evapotranspiração Potencial (ETP) e Real (ETR). Para o cálculo da ETP foi utilizado o método Thornthwaite e o resultado obtido foi de 1330 mm. Para a ETR o valor calculado foi de 432 mm, calculados pelo método exponencial. Peralta (2009) realizou trabalho em Barra de Maricá (área próxima ao presente estudo) no período de Fevereiro a Março do mesmo ano obteve uma ETP de aproximadamente 120 mm, comparativamente o valor médio para esse mesmo período obtido pela modelagem é de 94 mm, uma diferença satisfatória levando-se em conta que no verão os valores são mais elevados. O escoamento/fluxo superficial foi calculado pelo método de Horton, utilizando-se um coeficiente de escoamento de 0,05.

A recarga calculada foi de aproximadamente de 36% do volume precipitado anualmente de em

Sub-Bacia 1 (Itaipuaçu)		
Interceptação (Horton)	Cobertura Vegetal	Sem Interceptação
	Capacidade de Armazenamento (mm)	1,67
	Coeficiente de Interceptação	0,49
Solo edáfico	Reserva Útil (mm)	50
	Condutividade Hidráulica (m/s)	$6,94 \times 10^{-3}$
Recarga em Trânsito Direta		Sem Fluxo Preferencial
Recarga em Trânsito Retardado		Curva Logística (SAMPER et al., 1999)
Escoamento Superficial (Horton)	Capacidade de Infiltração Mínima (Capacidade de campo - CC)	25
	Capacidade de infiltração Máxima (Ponto de Murcha - PM)	40
Cálculo da ETP		Método Thornthwaite
Cálculo da ETR (método Exponencial)	Parâmetro CEME (mm)	10
Zona não Saturada	Coef. de Esgotamento de Fluxo Superficial (1/d)	0,0693 (10dias)
	Coef. de Esgotamento de Percolação (1/d)	0,1386 (5dias)
	Coef. de Armazenamento (1/d)	0,2
Aquífero	Coef. de Esgotamento (1/d)	0,99

Tabela 1 Parâmetros e opções aplicados na modelagem do balanço hídrico.

Itaipuaçu, cerca de 507 mm, que fornece um volume de 11.477.755 m³/ano de água ao aquífero.

4.3.2 Estimativa de Recarga pela Lei de Darcy

Para esta metodologia utilizaram-se parâmetros variados tanto para o gradiente hidráulico (i) [0,0016-0,004-0,01] como para condutividade hidráulica (K) [$1,07 \times 10^{-4}$ m/s], e assumiu se a espessura saturada do aquífero de 12 m.

Obteve-se então (Equação 8):

$$Q = \sum [i] \times [K] \times [\text{comprimento do seguimento (m)} \times 12\text{m}] \quad (8)$$

$$Q_{\text{total}} = 0,084 \text{ m}^3/\text{s}$$

Esta metodologia estimou uma recarga de aproximadamente - 2.649.024 m³/ano ao aquífero.

4.3.3 Balanço Hidrometeorológico Simplificado

A modelagem hidrometeorológica apresentou importantes resultados, em que a partir da extrapolação dos dados das estações da ANA, CPRM e INMET foi possível estimar a distribuição espacial da chuva na planície costeira de Itaipuaçu. O processamento no EasyBAL v4.0 indicou uma precipitação de 1396 mm e recarga variando de 29% a 38%. Essa variação da recarga se deu em função do cálculo das médias mensais e diárias, respectivamente. Adotaram-se os valores diários, por representarem melhor as variações tanto de precipitação como de temperatura.

Calculando o valor em m³ (Equação 9):

$$\Delta S = \Delta P \times R \times A_{\text{superficial}} \quad (9)$$

$$\Delta S = 1,396 \times 0,38 \times 22,6 \times 10^6 = 12.009.309 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Gerando um volume de recarga de aproximadamente 12.009.309 m³/ano.

4.3.4 Balanço de Cloretos

O balanço de cloretos é uma importante ferramenta usada como coadjuvante nas estimativas de recarga do aquífero. As análises químicas completas realizadas em amostras do aquífero indicaram uma média de 42,4 mg/L de cloreto. A análise realizada na água da chuva indicou um valor de 8,6 mg/L de cloreto.

A estimativa de recarga foi feita a partir de (Equação 10):

$$R = \frac{8,6}{42,4} = 0,20 \quad (10)$$

A razão do balanço de cloretos indicou uma recarga de aproximadamente 20%, porém este método considerou apenas uma amostra retirada em apenas um período do ano, o que eleva a margem de erro do balanço. O volume total correspondente a essa recarga é de 7.622.160 m³/ano. O aquífero pode ter seus teores de cloreto bastante aumentados em função do efeito do aerossol marinho e contaminação pela cunha salina. Esse aumento dos teores de cloreto pode levar a um falso resultado com o balanço de cloretos.

4.4 Simulação de Fluxo com Software Visual MODFLOW

- Modelo Conceitual

Com as informações hidrogeológicas coletadas no presente estudo, por meio de sondagens e análise *in situ* e bibliográfica, foi possível elaborar modelo simplificado da área de estudo, definido como uma sucessão de areias de granulometria média a muito grossa, intercaladas com camadas relativamente delgadas de argila. São discriminados dois aquíferos de água “doce”, localizados em diferentes níveis, a camada aquífera superior, de profundidade média de 12 m, e uma parte inferior entre 35-45 m de profundidade (Figura 6). Entre essas duas camadas aquíferas, ocorre ainda um corpo aquífero de elevada salinidade. A primeira e a segunda camada, representadas pelo aquífero superior e pelo aquífero salobro, respectivamente, são marcadas por ampla heterogeneidade litológica. A terceira camada representada pelo aquífero profundo é composta por predomínio de areias médias.

Pode-se inferir, a partir da análise de dados, que na área da baixada de Itaipuaçu, onde se encontra a maior parte da população do Distrito, a estratigrafia tem papel importante ao funcionar como uma barreira, impedindo que a água do mar salinize os aquíferos. Esta barreira é composta principalmente por uma camada muito espessa de argila e matéria orgânica, que representa o depósito lacustre intercordões (pleistocênico / holocênico). Sabe-se que essa camada é encontrada localmente

em toda a área, porém próximo ao canal da Costa este pacote possui maior espessura.

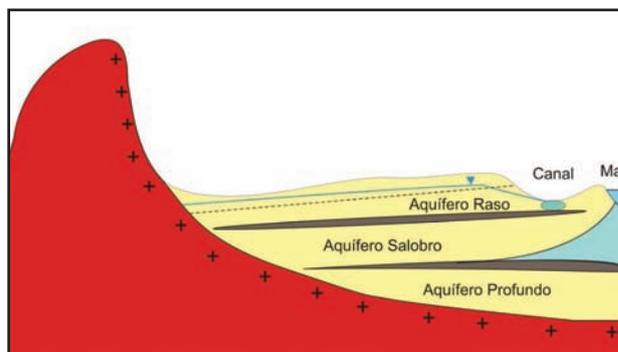


Figura 6 Perfil do Modelo Conceitual proposto para Planície Costeira de Itaipuaçu.

Durante a pesquisa observou-se que a maior parte da população de Itaipuaçu faz uso do aquífero granular, livre, raso, já que em média os poços construídos variam entre oito e doze metros de profundidade. Por conta dos elevados custos poucos moradores conseguem escavar poços mais profundos (em torno de 40 metros), a ponto de atingirem o aquífero mais profundo. Em função da limitação causada pela escassez de poços no aquífero mais profundo, o aquífero superior foi mais bem caracterizado no modelo hidrogeológico simplificado, sendo este o principal alvo da simulação de fluxo realizada no Visual MODFLOW.

- Simulação de fluxo no Visual MODFLOW

A simulação de fluxo foi aplicada no horizonte aquífero superior, cujos parâmetros hidráulicos (Condutividade Hidráulica – K_x , K_y e K_z , Armazenamento Específico - S_s e Porosidade Total e Efetiva) estão disponíveis na Tabela 2. Com relação à anisotropia da condutividade hidráulica, admitiu-se não haver diferenciação entre as propriedades nas componentes de K_x e K_y , sendo que para K_z adotou-se valor dez vezes maior.

$K_x = K_y$	$6,41 \times 10^{-5}$ cm/s
K_z	$6,41 \times 10^{-6}$ cm/s
S_s	0,039
Porosidade Total	~ 0,5
Porosidade Efetiva	0,468

Tabela 2 Parâmetros Hidráulicos da Simulação de Fluxo.

A área modelada é limitada a Oeste pela Pedra do Elefante e pela Serra da Tiririca, a Norte é limitada pela Pedra de Itaocaia, a Leste pela Lagoa Brava, e

a Sul é limitada pelo canal de Itaipuaçu. Com base no mapa potenciométrico, foram estabelecidos dois domínios de diferentes comportamentos de fluxo. Utilizaram-se duas condições de contorno, com carga especificada de 8 m ao Norte, próximo a Serra da Tiririca. Na porção Leste o fluxo drena em direção ao continente, este trecho foi atribuído carga especificada de 1,5 m a Norte, 1 m a Leste, também nesta porção foi aplicado uma *General-Head Boundary* (GHB) de carga 4 m em seu trecho Sul mais elevado. Sobre o canal de Itaipuaçu foi atribuído carga especificada de 1 m. A localização das condições de contorno utilizada na simulação está ilustrada na Figura 7. A simulação aplicada obteve um coeficiente de correlação entre os valores de carga hidráulica, calculados pela simulação, e aquelas mensurados nos poços de monitoramento, de 0,608. O resíduo médio obtido foi de 0,845 m, e erro normalizado quadrático de 21,024%.

O balanço hídrico calculado representou satisfatoriamente as cargas de entrada, as quais foram condizentes com os valores calculados manualmente com base no mapa potenciométrico do modelo conceitual.

O mapa potenciométrico calibrado (Figura 8) foi modelado a partir das cargas hidráulicas calculadas pelo MODFLOW. Este mapa apresentou bastante similaridade com o mapa elaborado manualmente a partir das cargas hidráulicas observadas.

Após a simulação e comparação dos mapas potenciométricos (Manual e Calculado), foram recalculados os gradientes hidráulicos em cada setor, e suas vazões. A vazão total obtida foi de 0,084 m³/s, o que gera um volume de 2.649.229,3 m³/ano para o mapa do modelo conceitual e 2.664.650 m³/ano para o calculado pelo *Visual ModFlow* com base na *Constant Head*. O balanço de massas calculado pelo *software* indicou um volume total de aproximadamente 10.022.950 m³/ano este valor é próximo a recarga total calculada com o *Visual Balan* que é de 11.477.755 m³/ano. O balanço de cloretos apresentou um valor intermediário entre esses dois resultados. A discrepância observada entre os resultados obtidos através das metodologias empregadas é objeto das discussões do próximo item.

Figura 7 Mapa de condições de contorno da área do estudo, Itaipuaçu, Maricá- RJ, Brasil.

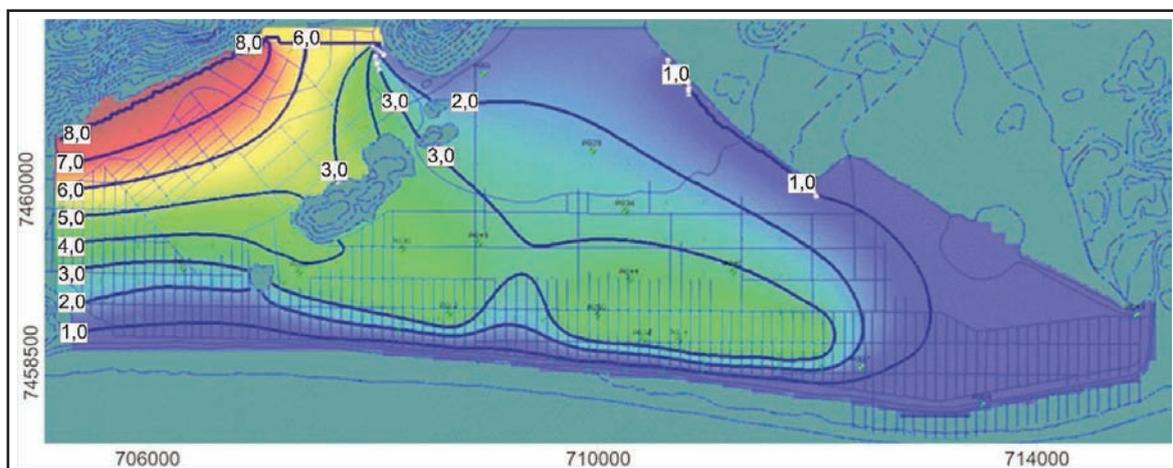
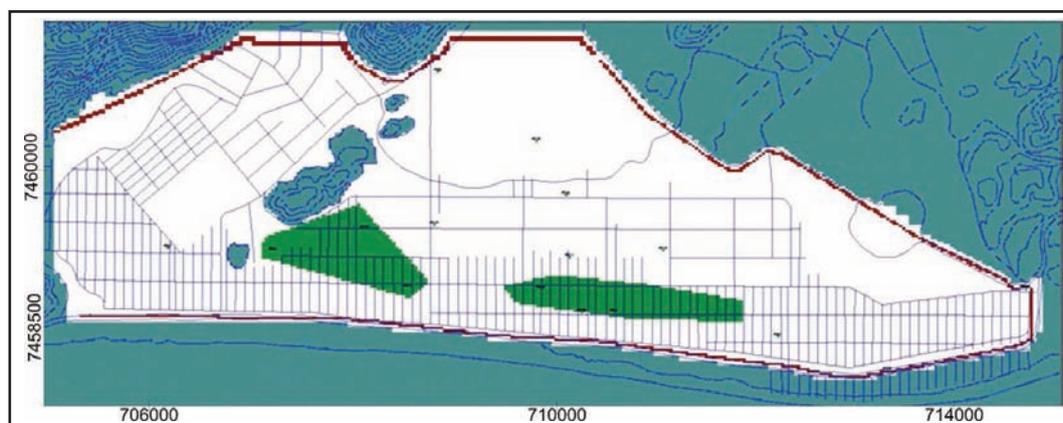


Figura 8 Mapa Potenciométrico do Aquífero Costeiro de Itaipuaçu.

4.5 Discussões

Os valores de recarga ao aquífero obtidos foram bastante discrepantes segundo o método empregado. A Tabela 3 apresenta a recarga conforme a metodologia empregada em sua estimativa. Observa-se que os valores obtidos com o emprego da Lei de Darcy resultam nos valores mais baixos, da ordem de 2,64 hm³/ano. Isso se deve ao fato de que os gradientes medidos no aquífero superior são bastante suaves o que, aliado a pequena espessura considerada para o aquífero, resulta nesses quantitativos. A espessura total do pacote sedimentar que drena o aquífero é consideravelmente maior.

Método	Volume (hm ³ /ano)
Visual BALAN	11,4
Estimativa pela lei de Darcy	2,64
Balanço Hidrometeorológico Simplificado	12,0
Balanço de cloretos	7,62
Visual MODFLOW	2,66/10,02

Tabela 3 Volumes de recarga obtidos nas diferentes metodologias.

O balanço de cloretos foi, como já dito, a estimativa mais sujeita a incertezas de medição, considerando que conta-se com somente uma medição de precipitação pluviométrica na área do estudo. O valor mensurado de recarga, da ordem de 20%, contudo, representa toda a água infiltrada no solo segundo o método. Contudo, boa parte não chega ao aquífero objeto do estudo, fluindo paralelamente às camadas aquíferas pelo aquífero raso.

O balanço hidrometeorológico, simplificado ou detalhado (Visual BALAN), deu como resultado um valor que representa toda a água infiltrada subterraneamente, independentemente da complexidade geológica e estratigráfica do substrato. Desse modo, o volume escoado pela camada aquífera objeto do presente estudo representa apenas uma fração do total infiltrado, havendo perdas tanto para um escoamento subsuperficial, quanto para os aquíferos das camadas inferiores.

Quanto aos resultados da simulação com o MODFLOW, após os ajustes de calibração realizados, estes são bastante similares aos do balanço hidrometeorológico, se se considera o total infiltrado no solo da área de estudo (somatório das entradas), é muito parecido com os resultados do cálculo pela Lei de Darcy, se a comparação é realizada com o fluxo na camada considerada. Os resultados da simulação com o MODFLOW devem ser aperfeiçoados futuramente, pois o modelo conceitual considerado é demasiadamente simplificado, não levando em conta a estratificação do meio, já citada.

5 Conclusões

O aquífero costeiro superior de Itaipuaçu apresenta características de um aquífero livre a semiconfinado, raso, com grande importância para abastecimento hídrico da população da região. Foram realizados estudos hidrodinâmicos, compreendendo a obtenção de parâmetros hidrodinâmicos e estratigráficos.

O levantamento topográfico pelo método DGPS foi uma maneira eficiente agregada ao medidor de nível, no nivelamento dos poços e no cálculo seus níveis freáticos.

A estratigrafia local, caracterizada por sua composição essencialmente arenosa e de granulometria média a grossa.

O teste de interferência mostrou-se eficiente na obtenção de parâmetros hidráulicos, porém, não houve uma representatividade espacial da anisotropia, havendo necessidade de uma melhor caracterização de alguns parâmetros do substrato, principalmente da condutividade hidráulica da área.

A comparação do balanço hídrico com o *Visual Balan v.2.0* com outras metodologias (estimativa por Darcy, balanço hidrometeorológico simplificado) confirmou uma recarga média de 36%, com um volume total recarregado de cerca de 11.460.000 m³/ano. O balanço de cloretos foi realizado, porém os resultados foram encarados com cautela, devido à escassez de amostras de água da chuva (somente uma), sendo esta possivelmente não representativa da média da água de recarga local. Os resultados da simulação com o *software Visual Modflow* indicam uma recarga total semelhante à estimada pelo Visual Balan e pelo balanço hidrometeorológico simplificado.

Considerando somente o aporte a massa de água que flui no aquífero modelado após a recarga com carga constante (fluxo permanente, aquífero livre, unicamada, numa versão simplificada adotada no presente estudo para o Visual-MODFLOW), os volumes são semelhantes aos da Lei de Darcy. As discrepâncias observadas devem-se ao fato de o modelo conceitual necessitar de refinamentos com respeito às condições de contorno e, principalmente, quanto a sua geometria.

Tanto no mapa potenciométrico calculado pelo Visual ModFlow quanto no mapa elaborado manualmente a partir das cargas hidráulicas observadas, dois domínios potenciométricos são visualizados, porém é claro que a influência dos corpos rochosos que os dividem deve ser melhor caracterizada.

6 Referências

- Almeida, G.M. & Silva Jr, G.C. 2007. Fatores Hidrogeológicos no Estudo da Intrusão Salina em Aquíferos Costeiros da Região Litorânea do Município de Maricá – RJ. *Anuário do Instituto de Geociências*, 30(2):104-117.
- Almeida, G. M. 2009. *Estudo do Aquífero Costeiro de Maricá – RJ: Instrumentação e Investigação do Comportamento da Cunha Salina*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 120 p.
- CIDE - FUNDAÇÃO CENTRO DE INFORMAÇÕES E DADOS DO RIO DE JANEIRO 1998. Território. 2. ed. Rio de Janeiro: CIDE. 1998. 80 p.
- Cleary, R.W. 1991. Qualidade das Águas Subterrâneas. In: PORTO. Hidrologia Ambiental. ABRH e EDUSP. São Paulo. p. 211-293.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2000. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações* In: Feitosa, F.A.C. & Filho, J.M. (coordenadores), Fortaleza – CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000, 391 p.
- Cristo, V.N. & Silva Jr., G.C. 2011. Caracterização e Modelo Hidrogeoquímico do Aquífero do Distrito de Itaipuaçu, Maricá - RJ, Brasil. In: CONGRESO ARGENTINO DE HIDROGEOLOGÍA, 7, SEMINARIO HISPANO-LATINOAMERICANO SOBRE TEMAS ACTUALES DELA HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA, CAPTACIÓN Y MODELACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA, 5, Salta, Argentina, p.173-180.
- Crosbie, R.; Jolly, I.; Leaney, F.; Petheram, C. & Wohling, D. 2010 Review of Australian Groundwater Recharge Studies. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship, 81 p.
- Custodio, E. 2002 Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10(2): 254-277.
- Espinha Marques, J.; Samper, J.; Pisani, B.V.; Alvares, D.; Vieira, G.T.; Mora, C., Carvalho, J.M.; Chaminé, H.I.; Marques, J.M. & Sodré Borges, F. 2006. Avaliação de recursos hídricos através de modelação hidrológica: aplicação do programa *Visual Balan* v2.0 a uma bacia hidrográfica na Serra da Estrela (Centro de Portugal). *Cadernos Laboratório Geológico de La Coruña*. 31(1): 43-65.
- Guiguer, N. & Franz, T. 1998. Visual MODFLOW. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Canada.
- Lowsby, M.G. & Alves M.G. 2000. Characterization of Coastal Aquifers in the Oceanic Area of Niterói- RJ, Brazil. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE GEOLOGIA, 31, *Anais*, Rio de Janeiro, p.1-19.
- Mcdonald, M.G.; HARBAUGH, B.R. 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. Techniques of Groundwater of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1. Washington: US Government Printing Office, 1988, 586p.
- Peralta, A.T. 2009 Hydrogeological Characterization in the Barra of Maricá, RJ, Brazil - MSc Thesis Project – vrije Universiteit Amsterdan, 2009.
- Pereira, A.J.; Gambôa, L.A.P.; Silva, M. A. M.; Rodrigues, A. R. & Costa, A. 2003. A Utilização do Ground Penetratin Radar (GPR) em Estudos de Estratigrafia na Praia de Itaipuaçu – Maricá (RJ). *Revista Brasileira de Geofísica*, 2(2):164-172.
- Samper, J., Hugué; Ares, J. And Garcíavera, M.A. (1999). Manual del usuario del programa *Visual Balan* v.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Technical Publication ENRESA, Madrid, 205p.
- Silva Jr., G.C. (Coord.), 2005. Relatório Final do Projeto ACOST-RIO: Estudo da Intrusão Marinha em Aquíferos Costeiros entre os Municípios de Niterói e Rio das Ostras – RJ. Rel. 154 p.
- Scanlon, B.R.; Healy, R. W. & Cook, P. G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1):18-39.
- Seabra, V.S.; Silva Jr., G.C. & Cruz; C.B.M. 2009. *Environmental Geology*, 57(3):665–674.
- Todd, D.K., & Mays, L.W. 2005. *Groundwater Hydrology* (3rd Edition): John Wiley and Sons, New York, 636 p.
- Vries J.J. & Simmers I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 5-17.

Webgrafia

- ANA - Agencia Nacional de Águas, HIDROweb. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/> (acessado em 28/09/2011 e 01/10/2011).
- CEPERJ - Anuário Estatístico do Estado do Rio de Janeiro (2011) - Volume 27. Edição Eletrônica. Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.ceperj.rj.gov.br/ceep/ent/anu_online.html (acessado em 15/08/2012).
- IBGE, Dado Populacional de Maricá, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=330240> (acessado em 29/03/2012).
- INMET - BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> (acessado em 05/09/2012 e 12/09/2012).